

Antje Büchner

Möglichkeiten zur Leistungssteigerung von Windenergieanlagen  
durch detaillierte Berechnung der Schallausbreitung und Schall-  
emissionskontingentierung

## DIPLOMARBEIT

Hochschule Mittweida

---

University of Applied Sciences

Fachbereich Mathematik, Physik, Informatik

Berlin, 2010

Antje Büchner

UT05wU1

Möglichkeiten zur Leistungssteigerung von Windenergieanlagen  
durch detaillierte Berechnung der Schallausbreitung und Schall-  
emissionskontingentierung

eingereicht als

## DIPLOMARBEIT

an der

Hochschule Mittweida

---

University of Applied Sciences

Fachbereich Mathematik, Physik, Informatik

Berlin, 2010

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Joern Hübelt

Zweitprüfer:

Dr.-Ing. Uwe Trautmann

Vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am: 31.03.2010

## **Bibliographische Beschreibung**

Büchner, Antje

Möglichkeiten zur Leistungssteigerung von Windenergieanlagen durch detaillierte Berechnung der Schallausbreitung und Schallemissionskontingentierung. - 2010. - 62 S. Mittweida, Hochschule Mittweida, Fachbereich Mathematik, Physik, Informatik, Diplomarbeit, 2010

## **Referat:**

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, die Möglichkeiten zur Leistungssteigerung durch eine Reduzierung des eingeschränkten Betriebes einer Windenergieanlage mittels Schallimmissionsprognose aufzuzeigen. Dabei soll sowohl der Einfluss der tatsächlichen Windrichtung und -geschwindigkeit als auch der Richtcharakteristik untersucht werden. Die Ergebnisse werden mit der gesetzlich festgelegten Auslegung für die Mitwind-Situation verglichen.

Des Weiteren soll anhand einer Schallemissionskontingentierung, die Aufteilung der Leistungsreduzierung auf mehrere Betreiber innerhalb eines Windparks untersucht und die Möglichkeit zur Leistungssteigerung der Windenergieanlagen aufgezeigt werden.

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen, die mich bei der Entwicklung und Entstehung der Arbeit unterstützt haben bedanken.

Bedanken möchte ich mich vor allem bei meinen Betreuern, hochschulseitig bei

**Herrn Prof. Dr. - Ing. Jörn Hübelt**

und betriebsseitig bei

**Herrn Dr. - Ing. Uwe Trautmann,**

der mir immer wieder wertvolle Anregungen und Ideen vermittelt hat.

Besonderer Dank, gilt den Mitarbeitern der Firma ABIT Ingenieure Dr. Trautmann GmbH und insbesondere Herrn Dr.-Ing. Rolf - Dieter Briese, der mit sehr viel Engagement, guten Ideen und unermüdlichem Einsatz meine Diplomarbeit mit betreut hat.

Meiner Familie, sowie meinen Freunden, danke ich für Ihr Verständnis, ihr Vertrauen und ihre Unterstützung, ohne die es mir nicht möglich gewesen wäre, diese Arbeit anzufertigen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>5</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>7</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>8</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>9</b>
<b>1 Windindustrie in Deutschland .....</b>	<b>11</b>
<b>2 Windenergieanlagen .....</b>	<b>13</b>
2.1 Aufbau und Funktion von Windenergieanlagen.....	13
2.1.1 Bauformen.....	13
2.1.2 Konstruktiver Aufbau .....	15
2.2 Rechtsgrundlagen für den Betrieb von Windenergieanlagen.....	17
2.3 Belästigungswirkung von Geräuschen auf den Menschen.....	19
<b>3 Grundlagen der Schallausbreitung bei Windenergieanlagen .....</b>	<b>21</b>
3.1 Schallausbreitung im Freien.....	21
3.1.1 Meteorologische Einflüsse.....	21
3.1.2 Bodeneffekt.....	23
3.1.3 Bewuchs und Hindernisse.....	23
3.1.4 Luftabsorption (Dissipation).....	23
3.2 Schallimmissionen im Umfeld von Windenergieanlagen.....	24
3.2.1 Abhängigkeit der Schallimmissionen vom Abstand zur Windenergieanlage .....	24
3.2.2 Infraschall.....	28
3.2.3 Windbedingte Fremdgeräusche.....	28
3.3 Geräuscentstehungsmechanismen.....	29
<b>4 Schallausbreitungsrechnung.....</b>	<b>31</b>
4.1 Aufgabenstellung .....	31
4.2 Angaben zur Schallimmissionsprognose.....	32
4.2.1 IMMI als Berechnungsprogramm .....	32
4.2.2 Grundlagen der Schallausbreitungsrechnung .....	33
4.2.3 Technische Daten der verwendeten Windenergieanlage.....	35

4.3 Schallimmissionsprognosemodell.....	36
4.3.1 Allgemeine Modellbeschreibung....	36
4.3.2 Detaillierte Schallausbreitungsrechnung am Standort .....	37
4.3.2.1 Gesetzlich festgelegte Mitwind-Situation.....	37
4.3.2.2 Möglichkeiten zur Leistungssteigerung .....	41
4.3.2.2.1 Berücksichtigung der Windrichtung.....	41
4.3.2.2.2 Berücksichtigung der Windgeschwindigkeit .....	45
4.3.2.2.3 Berücksichtigung der Richtcharakteristik einer Windenergieanlage .....	49
4.3.2.2.4 Abnahmemessung an einem ausgewählten Beispiel .....	52
4.3.2.3 Vergleich des Einflusses der tatsächlichen Winddaten mit den gesetzlich festgelegten Mitwinddaten auf die zu erwartenden Schallimmissionen .....	54
4.4 Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse .....	56
<b>5 Schallemissionskontingentierung.....</b>	<b>58</b>
5.1 Allgemeine Einführung .....	58
5.2 Gesetzliche und normative Vorgaben .....	58
5.3 Berechnungsschritte einer Emissionskontingentierung .....	60
5.4 Praktischer Nachweis einer Emissionskontingentierung an einem Windpark mit mehreren Betreibern.....	66
5.4.1 Allgemeine Modellbeschreibung.....	66
5.4.2 Praktische Durchführung einer Schallemissions- kontingentierung.....	67
5.4.3 Beurteilung der Ergebnisse.....	69
5.5 Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse .....	70
<b>6 Zusammenfassung .....</b>	<b>71</b>
<b>Anhang A: Berechnungen .....</b>	<b>73</b>
<b>Anhang B: Tabellen .....</b>	<b>80</b>
<b>Anhang C: Abbildungen .....</b>	<b>85</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>86</b>
<b>Selbstständigkeitserklärung .....</b>	<b>89</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1.1 - 1: Windenergieanlage mit horizontaler Drehachse.....	14
Abbildung 2.1.1 - 2: Savonius- (li.), Darrieus- (Mitte), H-Darrieus-Rotor (re.).....	14
Abbildung 2.1.2 - 1: Konstruktiver Aufbau einer Windenergieanlage .....	15
Abbildung 3.1.1 - 1: Labile Wetterlage (Schnittdarstellung).....	21
Abbildung 3.1.1 - 2: Stabile Wetterlage (Schnittdarstellung) .....	22
Abbildung 3.1.1 - 3: Brechung der Schallstrahlen und Schattenbildung je nach Windrichtung (Schnittdarstellung).....	22
Abbildung 3.2.1 - 1: Kurven gleichen Beurteilungspegels, im Umfeld einer Windenergieanlage .....	25
Abbildung 3.2.1 - 2: Beurteilungspegel in Abstand zu 7 Windenergieanlagen .....	26
Abbildung 3.2.1 - 3: Beurteilungspegel in der Nachbarschaft, im Umfeld von 21 Windenergieanlagen .....	27
Abbildung 4.3.1 - 1: Vereinfachtes Modell einer Windenergieanlage mit 4 Immissionsorten (0° bis 270°) und bei ebenen Gelände.....	36
Abbildung 4.3.2.2.1 - 1: Schallausbreitungsmodell mit 4 Immissionsorten unter Berücksichtigung der Windrichtung, Wind weht in Richtung 0° .....	42
Abbildung 4.3.2.2.1 - 2: Darstellung der Pegeldifferenzen zwischen richtungsabhängiger Mitwind-Situation und realer Windsituation bei konstanter Windgeschwindigkeit, bei einem Abstand r von 1330 m zu den Immissionsorten.....	44
Abbildung 4.3.2.2.2 - 1: Darstellung der Immissionspegel am Immissionsort bei Mitwind-Situation in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe und bei einem Abstand von 1330 m zum Immissionsort.....	47
Abbildung 4.3.2.2.2 - 2: Darstellung der Immissionspegel am Immissionsort bei Mitwind- situation in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe und bei einem Abstand von 1330 m zum Immissionsort, Zuordnung der Nennleistung der WEA.....	48
Abbildung 4.3.2.2.3 - 1: Mittlere Richtcharakteristik einer Windenergieanlage nach [23].....	50
Abbildung 4.4 - 1: Darstellung der sich ergebenden Pegeldifferenzen gegenüber der normgerechten Berechnung.....	56
Abbildung 5.3 - 1: Darstellung eines vereinfachten Modells eines Gewerbegebiets mit einer bereits vorhandenen Vorbelastung durch eine Anlage ( $Q_1$ ), Festlegung der Immissionsorte (1. IO und 2. IO).....	63
Abbildung 5.3 - 2: Unterteilung des Plangebietes in 2 Teilflächen (TF 1 und TF 2), Festlegung einer weiteren geplanten Bebauung ( $Q_2$ ) auf der zweiten Teilfläche.....	64
Abbildung 5.4.1 - 1: Vereinfachtes Modell eines Windparks mit 9 Windenergieanlagen (A1 bis A 9) und Festlegung der zu untersuchenden Immissionsorte (1. bis 4. IO).....	66
Abbildung 5.4.2 - 1: Festlegung der Teilflächen (TF 1 bis TF 9) innerhalb des Windparks .....	67

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.2 - 1: Zulässige Immissionsrichtwerte "Außen" nach TA Lärm .....	19
Tabelle 3.2.2 - 1: Hörschwellenpegel im Infraschallbereich nach DIN 45680.....	28
Tabelle 4.2.3 - 1: Betriebsdaten der verwendeten WEA.....	35
Tabelle 4.3.2.1 - 1: Immissionspegel an den Orten 0° bis 270° für Tag und Nacht.....	40
Tabelle 4.3.2.2.1 - 1: Darstellung der Dämpfungen $D_{W,r}$ bei einer Geschwindigkeit von 5 m/s in 10 m Höhe und in einem Abstand r von 1330 m zu den Immissionsorten.....	43
Tabelle 4.3.2.2.2 - 1: Darstellung der entsprechenden Windgeschwindigkeiten in verschieden Höhen, bei denen die Anlage in Betrieb ist .....	45
Tabelle 4.3.2.2.2 - 2: Darstellung der Dämpfungen $D_{W,r}$ bei konstanter Windsituation (bei 0° der Mitwindlage), bei variabler Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe und bei einem Abstand r von 1330 m zum Immissionsort.....	46
Tabelle 4.3.2.2.2 - 3: Darstellung der Dämpfungen $D_{W,r}$ und die sich daraus ergebenden Immissionspegel bei einem Winkel von 0° (Mitwindwetterlage), bei Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe und bei einem Abstand r von 1330 m zum Immissionsort.....	47
Tabelle 4.3.2.2.3 -1: Einflussfaktoren auf die Richtwirkung der Windenergieanlage.....	51
Tabelle 4.3.2.2.4 - 1: Betriebsdaten der Windenergieanlage Enercon E-70 E 4.....	52
Tabelle 4.3.2.2.4 - 2: Garantierte Werte für die Schalleistungspegel der E-70 E4 bei den jeweiligen Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe und einer Nabenhöhe von 113 m.....	53
Tabelle 5.2 - 1: Gebietseinstufungen mit dazugehörigen Immissionsrichtwerten nach TA Lärm und Orientierungswerten nach DIN 18005 Bbl. 1.....	59
Tabelle 5.3 - 1: Vergleich der berechneten Immissionskontingente mit den festgelegten Plan- werten am ersten und zweiten Immissionsort.....	65
Tabelle 5.3 - 2: Darstellung der neuen Immissionskontingente gegenüber den Planwerten an den einzelnen Immissionsorten (IO) und Festlegung des Zusatzkontin- gents.....	65
Tabelle 5.4.2 - 1: Festlegung der Gesamt-Immissionswerte an den Immissionsorten .....	67
Tabelle 5.4.2 - 2: Vergleich der berechneten Immissionskontingente mit den festgelegten Planwerten an den einzelnen Immissionsorten (1. bis 4. IO) für die Nacht....	68
Tabelle 5.4.2 - 3: Vergleich der neu berechneten Immissionskontingente mit den festgelegten Planwerten an den einzelnen Immissionsorten (1. bis 4. IO) für die Nacht.....	69



## Abkürzungsverzeichnis

WEA	Windenergieanlage(n)
kW	Kilowatt
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
kWh	Kilowattstunde
m	Meter
dB	Dezibel
ca.	circa
z. B.	zum Beispiel
bzw.	beziehungsweise
li.	links
re.	rechts
etc.	et cetera
BauGB	Baugesetzbuch
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
UVPG	Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz
i. V. m.	in Verbindung mit
Nr.	Nummer
Abs.	Absatz
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
d.h.	das heißt
Abb.	Abbildung
Tab.	Tabelle
DIN	Deutsches Institut für Normung
ISO	Internationale Organisation für Normung
EN	Europäische Norm
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
TA Lärm	Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm
vgl.	vergleiche
s. o.	siehe oben
ggü.	gegenüber

i. d. R.	in der Regel
Bbl.	Beiblatt
1. OG	1. Obergeschoss
2. OG	2. Obergeschoss
s.	siehe

## 1 Windindustrie in Deutschland

Die regenerative Energiequelle Wind wird in vielen Regionen der Welt schon seit Jahrhunderten genutzt. Unter dem Schutz der hohen Energiepreise durch Rohstoffverknappung waren während des ersten Weltkrieges in Deutschland 120 Windenergieanlagen (WEA) mit einer Leistung von 10 - 35 kW in Betrieb. Auf Grund von Geldmangel wurden keine weiteren Anlagen in diesem Zeitraum errichtet. Erst in den zwanziger Jahren wurde die Windenergieforschung in Deutschland fortgesetzt. Nach dem zweiten Weltkrieg sanken vorerst die Preise für Energie und damit ging das Interesse an Windenergie zurück. In den folgenden Jahrzehnten wurden vielerlei Versuchsreihen hinsichtlich Größe, Material, Konstruktion und Leistung an Windenergieanlagen durchgeführt. Deutschen Unternehmern gelang es in den achtziger und neunziger Jahren dem jungen Markt beizutreten, nicht nur infolge der positiven Entwicklung auf dem eigenen Markt durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG ab 1991), sondern vor allem durch die Entwicklung großer leistungsstarker Windanlagen. Andere Länder wie z.B. Dänemark, Großbritannien, Frankreich und die USA hatten bereits erfolgreich auf dem jungen Markt für Windenergie bestand. Insbesondere nach der Jahrtausendwende ist in Deutschland durch das EEG die Energieerzeugung aus Windenergie stark angestiegen.

Deutschland übernahm daraufhin einige Jahre weltweit die Führung in der Energieerzeugung aus Windkraft. Erst im Jahre 2008 übertraf die USA Deutschland als Großherzeuger.

Die Mehrzahl der errichteten Windenergieanlagen steht auf dem Festland (Onshore). Um einen weiteren Aufschwung zu erzielen, sollen in den nächsten Jahren Offshore-Projekte (WEA im Meer, an der Küste entlang) umgesetzt werden.

Deutschland profitiert nicht nur von dem zunehmenden Wachstum an Anlagen im Land selbst, sondern auch von deutschen Windanlagen- und -komponentenherstellern. Die Hersteller sind im hohen Maße an der weltweiten Entwicklung, Verbesserung und Herstellung von Windenergieanlagen beteiligt. Damit nimmt Deutschland in Bezug auf die Fortentwicklung der Technologie und des Ausbaus weltweit genutzter Kapazitäten eine Vorreiterstellung ein.

Die derzeit größten deutschen Windenergieanlagen haben eine Nennleistung  $P_N$  von 5 - 6 MW. Bei Cottbus steht die höchste Windenergieanlage Deutschlands mit einer Gesamthöhe (Nabenhöhe + Rotor) von 205 m. Diese erzeugte 2007 über 5.600 MWh Strom.

Mit dieser Strommenge kann der Strombedarf von 1.600 deutschen Haushalten gedeckt werden. Die bis 2008 installierten Windenergieanlagen produzierten in Deutschland ca. 40 Milliarden kWh Strom. Damit deckt die Windenergie heute 6,5 % des gesamten Strombedarfs in Deutschland. Dabei ist das Potential dieser Energie noch nicht ausgeschöpft.

Die Vergrößerung des Windenergiesektors sorgt einerseits für einen größeren Anteil an der Stromversorgung durch umweltfreundliche regenerative Energie. Auf der anderen Seite leistet sie einen wesentlichen Beitrag zum Ausbau des Wirtschaftszweiges der erneuerbaren Energien. Dadurch konnten viele Arbeitsplätze geschaffen werden. Im Jahre 2006 waren in der Industrie 70.000 Menschen beschäftigt und 2007 waren es bereits 84.300, Tendenz steigend [1]. Wie geht es zukünftig in Deutschland bezüglich Windenergie weiter?

In Deutschland wurde bereits damit begonnen, ältere Windenergieanlagen durch neue leistungsstärkere und leisere Maschinen der neusten Generation auszutauschen. Die neuen Anlagen garantieren eine höhere technische Verfügbarkeit, einen deutlich höheren Ertrag und leisten einen Beitrag zur Netzsicherheit. Durch dieses so genannte Repowering können ertragreiche Standorte noch effektiver genutzt werden. Der Weltmarkt wird dadurch zukünftig rasant wachsen.

Vorhersagen zufolge, soll bis zum Jahre 2020 in der ganzen Welt 12 % der Elektrizitätsversorgung durch Windenergie gedeckt werden können. Außerdem geht der Weltverband der Windenergieindustrie "Global Wind Energy Council" (GWEC) davon aus, dass die Windenergie im Jahre 2050 mehr als 34 % des weltweiten Strombedarfs klimafreundlich decken wird.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Möglichkeiten zur Leistungssteigerung durch Reduzierung des eingeschränkten Betriebs von Windenergieanlagen mittels detaillierter Schallausbreitungsrechnung und Schallemissionskontingentierung aufzuzeigen.

Im Folgenden werden die technischen, gesetzlichen und immissionsrelevanten Grundlagen von Windenergieanlagen aufgeführt. Im Kapitel 4 sollen Möglichkeiten zur Leistungssteigerung gegenüber der gesetzlich festgelegten Mitwind-Situation dargestellt werden. Zudem wird im Kapitel 5 mittels einer Schallemissionskontingentierung, die Aufteilung der Leistungsreduzierung auf mehrere Betreiber innerhalb eines Windparks untersucht und die Möglichkeit zur Leistungssteigerung der Windenergieanlagen aufgezeigt.

## 2 Windenergieanlagen

### 2.1 Aufbau und Funktion von Windenergieanlagen

Eine Windenergieanlage ist eine Anlage, die unabhängig von der Anwendung, Bauform oder Konstruktion, die kinetische Energie der Luftströmung in mechanische Arbeit umwandelt. Windenergieanlagen lassen sich nach [2] hinsichtlich ihrer aerodynamischen Wirkungsweise und nach ihrem konstruktiven Aufbau unterscheiden. Der Unterschied in der Wirkungsweise liegt darin, ob die Anlage ihre Leistung aus dem Luftwiderstand bezieht oder ob der aerodynamische Auftrieb<sup>1</sup> des Windes genutzt wird. Bei der Konstruktion ist die Lage der Drehachse des Rotors für die Unterscheidung bedeutsam. Daher werden diese Anlagen nach vertikaler und horizontaler Rotordrehachse unterschieden.

#### 2.1.1 Bauformen

##### *Horizontale Rotordrehachse*

Windenergieanlagen mit horizontaler Drehachse müssen der Windrichtung nachgeführt werden. Die Gondel ist mit einem Azimutlager horizontal drehbar auf dem Turm angebracht. „Dieses Lager dient dazu, die Gondel so in den Wind zu drehen, dass eine optimale Anströmung der Rotorblätter und damit ein maximaler Energieertrag gewährleistet ist.“[3] Über einen Windrichtungsgeber wird die Windrichtung bestimmt. Die Ausrichtung in die jeweilige Windlage erfolgt mittels Stellmotoren.

Des Weiteren wird unterschieden, ob der Rotor sich auf der dem Wind zugewandten Seite (Luvläufer) oder abgewandten Seite (Leeläufer) des Turmes befindet [2]. Der Vorteil bei einem Leeläufer besteht darin, dass bei kleinen Anlagen auf einen Windnachführungsmechanismus verzichtet werden kann.

---

<sup>1</sup> Jeder angeströmte Körper erfährt eine Luftkraft, deren Komponenten in Strömungsrichtung als Luftwiderstand und senkrecht zur Anströmungsrichtung als aerodynamischer Auftrieb bezeichnet werden. Aus der erzeugten Kraft kann die Leistung abgeleitet werden.

Der Wind treibt den Rotor automatisch in die richtige Richtung und vollführt eine passive Windnachführung. Bei größeren Windenergieanlagen findet diese Variante keine Anwendung, weil es zu mechanischen Schwingungserscheinungen, starker Infraschallabstrahlung und zu elektrischen Schwankungen kommen kann.



Abbildung 2.1.1 - 1: Windenergieanlage mit horizontaler Drehachse [4]

### *Vertikale Rotordrehachse*

Anlagen mit vertikaler Rotordrehachse gibt es als Savonius-Rotor, Darrieus-Rotor oder H-Darrieus-Rotor [2].

Ein großer Vorteil bei diesen Bauten ist die Wirkungsweise, die auf dem aerodynamischen Auftrieb des Windes beruht und unabhängig von der Windrichtung ist. Ein weiterer Punkt der für sie spricht ist, dass sie auch bei extrem niedrigen Windgeschwindigkeiten arbeiten und Strom liefern. Außerdem sind sie einfach in Aufbau und Montage.

Solche Windenergieanlagentypen bringen aber auch Nachteile mit sich, z.B. die Unfähigkeit selbst anzulaufen und die fehlende Möglichkeit, durch das Verstellen der Rotorblätter die Drehzahl und die damit verbundene Leistung regeln zu können.

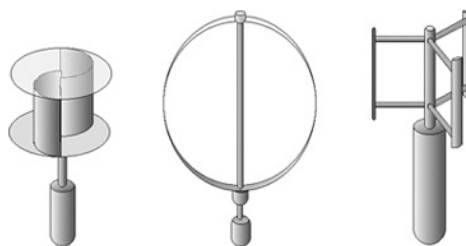


Abbildung 2.1.1 - 2: Savonius- (li.), Darrieus- (Mitte), H-Darrieus-Rotor (re.) [2]

### 2.1.2 Konstruktiver Aufbau

Im Folgenden dieser Arbeit werden nur Windenergieanlagen mit einer horizontalen Rotordrehachse betrachtet.

Das Modell der horizontalen Anlagenart besteht aus mehreren Hauptkomponenten [5]:

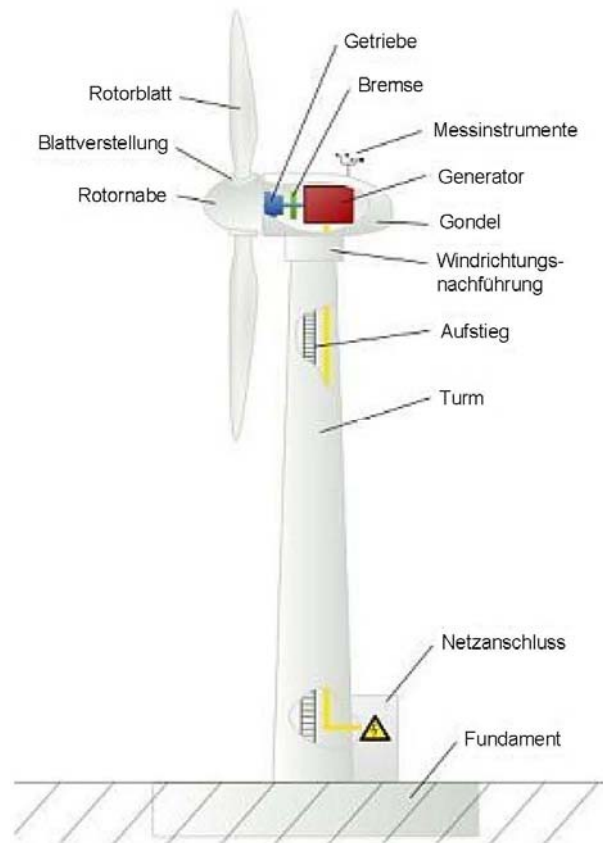


Abbildung 2.1.2 - 1: Konstruktiver Aufbau einer Windenergieanlage [6]

- **Fundament**

Die Art der Fundamente ist abhängig von der Bodenbeschaffenheit und der Belastung der Windenergieanlage. Es werden Flachfundamente oder Tiefengründungen verwendet.

- **Turm**

Das längste Glied der Windenergieanlage ist der Turm. Die Turmhöhe kann von Anlage zu Anlage variieren. Von Vorteil sind hohe Türme, da mit zunehmender Höhe die Windgeschwindigkeit und somit auch die Leistung zunimmt.

Gondel und Rotor werden vom Anlagenturm getragen, somit muss er eine hohe Festigkeit bzw. Stabilität aufweisen.

Es können drei Turmarten unterschieden werden: Gittermast-, Stahlrohr- und Betonrohrturm. In den meisten Fällen werden Stahl- und Betonrohtürme verwendet.

- Gondel

Der wichtigste Teil der Windeenergieanlage ist das Maschinenhaus, die so genannte Gondel. Sie beinhaltet fast alle notwendigen Komponenten für den Betrieb (Antriebswelle, Hauptlager, Getriebe, Generator, Windrichtungsnachführung, etc.).

- Rotor mit Nabe und Rotorblätter

An der Vorderseite der Antriebswelle ist der Rotor montiert. Er besteht aus einer Nabe und drei Rotorblättern. Die Blätter dienen dazu, Windenergie aufzunehmen und über die Nabe und das Getriebe an den Generator weiterzuleiten.

- Getriebe und Generator

Das Getriebe der Windenergieanlage passt die Drehzahl des Rotors an die des Generators an. Wenn der Generator schnell genug läuft, um Strom erzeugen zu können, wird er auf das Netz geschaltet und der erzeugte Strom in das Energieversorgungsnetz eingespeist.

- Windnachführung

Von besonderer Bedeutung ist die Windnachführung. Die Nachführung verbindet nicht nur den Turm mit der Gondel, sondern sorgt auch für eine optimale Ausrichtung der Anlage in den Wind.



## 2.2 Rechtsgrundlagen für den Betrieb von Windenergieanlagen

Windenergieanlagen zählen in ihrer Errichtung und Betrieb zu den bau- und umweltrechtlich genehmigungspflichtigen Anlagen. Oft ist ein Raumordnungsverfahren gemäß § 10 des Baugesetzbuches (BauGB) sowie eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) gemäß § 2 und § 3 des Gesetzes für eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) notwendig. „Die Umweltverträglichkeitsprüfung umfasst die Ermittlung, Beschreibung und Bewertung der unmittelbaren und mittelbaren Auswirkungen eines Vorhabens auf:

- Mensch, einschließlich der menschlichen Gesundheit, Tiere und Pflanzen
- Boden, Wasser, Luft, Klima und Landschaft
- Kulturgüter und sonstige Sachgüter sowie
- die Wechselwirkung zwischen den vorgenannten Schutzgütern.“[7]

### Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP)

Die Errichtung und der Betrieb eines Windparks (mindestens 3 Anlagen) mit einer Anlagengesamthöhe (Nabenhöhe mit Rotor) von mehr als 50 m fallen unter das Gesetz der Umweltverträglichkeitsprüfung. Die Regelung gilt allerdings nur, wenn eine bestimmte Anzahl von Windenergieanlagen (§§ 3b, 3c i. V. m. Anlage Nr. 1.6 UVPG, [32]) erreicht oder überschritten wird.

Demzufolge ist für einen Windpark mit 3 bis 5 Anlagen eine standortbezogene Vorprüfung, mit 6 bis 19 Anlagen eine allgemeine Vorprüfung und mit 20 oder mehr Windenergieanlagen eine UVP erforderlich [32]. Eine UVP ist ebenfalls bei Änderungen oder Erweiterungen eines bestehenden, bisher nicht UVP-pflichtigen Vorhabens durchzuführen, sofern der obere Grenzwert (20 und mehr WEA) durch die zu berücksichtigenden Anlagen erstmals erreicht oder überschritten wird.

## **Planungsrechtliche Zulässigkeit**

### *Innenbereich*

Gemäß § 34 BauGB [34] ist die Errichtung von Windenergieanlagen zulässig, wenn sie sich nach Art und Maß der baulichen Nutzung, der Bauweise und der Grundstücksfläche, die überbaut werden soll, in die Eigenart der näheren Umgebung einfügen und die Erschließung gesichert ist.

### *Außenbereich*

Windenergieanlagen sind im Außenbereich als selbstständige Anlagen gemäß § 35 Abs. 1 Nr. 5 BauGB [34] privilegiert zulässig, soweit keine öffentlichen Belange entgegenstehen und die ausreichende Erschließung gesichert ist. Zu den öffentlichen Belangen gehört der Schutz vor unzumutbaren Lärm.

Des Weiteren sind im Außenbereich folgende Kriterien zu berücksichtigen:

- Beeinflussung des Landschaftsbildes,
- Vogelschutz,
- Luftverkehr,
- Funkstellen, Radaranlagen etc..

## **Immissionsschutzrechtliche Zulässigkeit**

Windenergieanlagen sind bei einer Gesamthöhe von mehr als 50 m im Sinne von § 3 Abs. 5 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes ([33], BImSchG) genehmigungsbedürftige Anlagen. Sie unterliegen somit immissionsrechtlichen Anforderungen insbesondere dem § 5 des BImSchG [33]. Es dürfen von den Anlagen keine schädlichen Umwelteinwirkungen ausgehen, was durch die Einhaltung erforderlicher Abstände, gegebenenfalls verbunden mit emissionsreduzierenden Auflagen (Drehzahlbegrenzung, zeitweise Abschaltung der Anlage) geschehen kann.

Die immissionsschutzrechtliche Beurteilung der Geräuscheinwirkung erfolgt unter Beachtung der Verfahren und Anforderungen der 6. Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum BImSchG, der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm [9]).

In der folgenden Tabelle werden die Anforderungen bzw. zulässigen Immissionsrichtwerte "Außen"<sup>2</sup> in Abhängigkeit von der baulichen Nutzung dargestellt.

Tabelle 2.2 - 1: Zulässige Immissionsrichtwerte "Außen" nach TA Lärm [9]

Gebietseinstufung nach baulicher Nutzung		Immissionsrichtwerte	
		tags in dB(A)	nachts in dB(A)
Industriegebiet	GI	70	70
Gewerbegebiet	GE	65	50
Kern-, Dorf- und Mischgebiet	MK, MD, MI	60	45
Allgemeines Wohngebiet	WA	55	40
Reines Wohngebiet	WR	50	35
Kurgebiete, Krankenhäuser, Pflegeanstalten	-	45	35

### 2.3 Belästigungswirkung von Geräuschen auf den Menschen

Häufig kommt es zu einem Widerspruch zwischen dem Ruhebedürfnis von Bewohnern in ländlichen Gebieten und der verwaltungsrechtlich festgesetzten Schutzwürdigkeit des jeweiligen Gebietes.

Nach dem BImSchG sollen Menschen, Tiere und Pflanzen vor umweltschädlichen Einwirkungen geschützt werden. In dem Abschnitt 3.2.1 Abs. 1 der TA Lärm wird der Schutzanspruch nochmals konkretisiert. Darin steht: „Der Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Geräusche (§ 5 Abs. 1 Nr.1 BImSchG) ist vorbehaltlich der Regelungen in den Absätzen 3 bis 5 sichergestellt, wenn die Gesamtbelastung am maßgeblichen Immissionsort die Immissionsrichtwerte nach Nummer 6 nicht überschreitet.“[9] (s. Tabelle 2.2 - 1).

Außerdem geht aus der Lärmwirkungsforschung hervor, dass die Belästigungsreaktion einer Person auf wahrgenommene Geräusche lediglich zu ca. 33 % auf physikalisch beschreibbare Aspekte des akustischen Stimulus<sup>3</sup> beruht.

Ein weiteres Drittel wird durch den Einfluss von so genannten Moderatoren (Lärmempfindlichkeit, Einstellung zur Quelle, Einschätzung der Vermeidbarkeit des Geräusches, Wohnumgebung) beschrieben. Das letzte Drittel kann noch nicht eindeutig zugeordnet werden.

<sup>2</sup> Die zulässigen Immissionsrichtwerte gelten vor der Fassade vom Gebäude mit schutzbedürftiger Nutzung.

<sup>3</sup> Der akustische Stimulus ist ein Reiz, der durch ein Geräusch ausgelöst wird.

Folglich ist die Wahrnehmung von Mensch zu Mensch verschieden, daher wird für die Festsetzung von Schutzkriterien von dem Empfinden eines durchschnittlichen, repräsentativen, verständigen Menschen ausgegangen. Die Geräuschempfindlichkeit von einem Durchschnittsmenschen ist von der Tageszeit abhängig. Weshalb die Immissionsrichtwerte nach Tag und Nacht unterschieden werden.

Des Weiteren werden in der TA Lärm die Gebiete nach ihrem Nutzungscharakter differenziert, d.h. wir unterscheiden Industriegebiet, Gewerbegebiet, Kern-, Dorf- und Mischgebiet, Allgemeines Wohngebiet, Reines Wohngebiet und Kurgebiet. Diese Gebietscharakterisierung ist bezüglich der Bewertung eines Geräusches nach dem Ruheanspruch der Betroffenen in ihrem Wohnumfeld zu berücksichtigen. Auffällige Geräusche, die meist als lästig gelten, werden bei der Beurteilung nach TA Lärm mit einem Impuls- und Tonzuschlag versehen (s. Abschnitt 4.2.2).

Letztendlich nehmen Bewohner in ländlichen Gebieten die Geräusche intensiver und störender wahr als jene, die in der Nähe von Industriegebieten, Gewerbegebieten usw. leben. Aber auch das Erscheinungsbild der Umgebung spielt eine Rolle, wie die Geräusche wahrgenommen werden. Zum Beispiel werden Windenergieanlagen von Dorfbewohnern nur schwer akzeptiert, da sie gleichzeitig das Landschaftsbild zunehmend beeinträchtigen. Daher werden auch weiterhin die Beschwerden über Lärmbelästigung in Bezug auf Windenergieanlagen aus den ländlichen Regionen kommen [10], [11].

## 3 Grundlagen der Schallausbreitung bei Windenergieanlagen

### 3.1 Schallausbreitung im Freien

Die Schallausbreitung im Freien ist abhängig von einigen wesentlichen Einflussgrößen. Im Zusammenhang mit der TA Lärm [9] werden in der DIN ISO 9613, Teil 2 [13] z.B. meteorologische Faktoren wie Wind und Temperatur und Faktoren wie Bewuchs, Hindernisse, Luftabsorption und Bodeneffekt berücksichtigt.

#### 3.1.1 Meteorologische Einflüsse

Wind- und Temperatureffekte können die Reichweite der Schallausbreitung erheblich beeinflussen.

Im Gegensatz zum Faktor Wind wirkt sich die Lufttemperatur richtungsunabhängig auf die Schallgeschwindigkeit aus. Es gibt mehrere Wetterlagen, wo sich die Lufttemperatur unterschiedlich auswirkt. Bei labilen Wetterlagen nimmt die Lufttemperatur mit der Höhe ab. Auf Grund der Tatsache, dass die Schallgeschwindigkeit in Abb. 3.1.1 - 1 mit zunehmender Temperatur ansteigt, nimmt die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwellen mit der Höhe ab. Damit wird der Gradient der Schallstrahlen vom Boden weggelenkt, und es kommt zur Ausbildung einer Schattenzone.

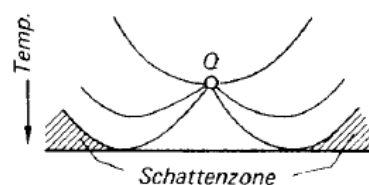


Abbildung 3.1.1 - 1: Labile Wetterlage (Schnittdarstellung) [12]

Bei stabilen Wetterlagen nimmt die Temperatur und damit auch die Schallgeschwindigkeit mit der Höhe zu. Daher kommt es zur Brechung der Schallstrahlen in Richtung Boden (vgl. Abbildung 3.1.1 - 2).

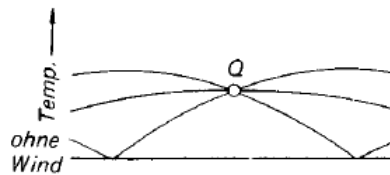


Abbildung 3.1.1 - 2: Stabile Wetterlage (Schnittdarstellung) [12]

Der Faktor Wind hingegen wirkt sich auf die Schallausbreitung in alle Richtungen unterschiedlich aus, dies ist abhängig von der Windrichtung und -stärke. Es gibt mehrere Windsituationen, die unterschieden werden müssen. Zum einen die Mitwind-Situation (Wind in Richtung der Schallausbreitung), sie führt zu einer Unterstützung der Schallausbreitung. Die Ursache dafür ist die gleichartige Überlagerung von Schallfeld und Strömungsfeld. Folglich kommt es zu einer Erhöhung der Lärmbelastung bei gleicher Entfernung. Umgekehrt ist die Gegenwind-Situation zu betrachten, sie führt zu einer Verminderung der Schallabstrahlung.

Hinzu kommt, dass die Windgeschwindigkeiten mit zunehmender Höhe über dem Boden zunehmen. Daraus resultiert, dass die Schallstrahlen gebrochen werden und sich Schattenzonen ausbilden. Je nach Windrichtung werden die Strahlen vom Boden weg bzw. hin gebrochen (vgl. Abbildung 3.1.1 - 3). Bei der Ausbreitung der Schallwellen mit dem Wind (Leeseite) werden sie zum Erdboden hin gebrochen. Dadurch wird der Schall über weitere Strecken übertragen.

Bei Wind gegen die Ausbreitungsrichtung der Schallwellen (Luvseite) werden die Wellen vom Boden weg gebrochen und es entstehen Schattenzonen, in die kein Direktschall an den Immissionsort gelangt. Damit wird der Schall im gleichen Abstand zur Schallquelle auf der Leeseite stärker wahrgenommen als auf der Luvseite.

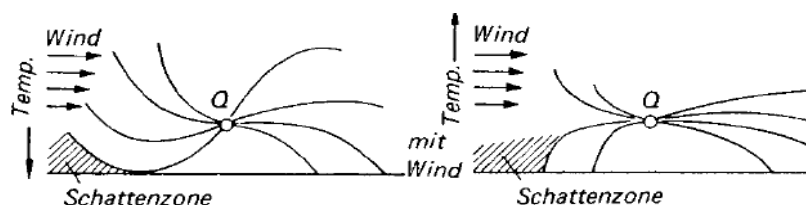


Abbildung 3.1.1 - 3: Brechung der Schallstrahlen und Schattenbildung je nach Windrichtung (Schnittdarstellung) [12]

Der Einfluss des Windes wird nicht nur durch die jeweilige Windrichtung, sondern auch durch die Windgeschwindigkeit bestimmt.

### 3.1.2 Bodeneffekt

Mittels einer Art Bodendämpfung wird eine Pegelminderung erzielt. Dabei kommt es auf die Höhe, in der sich die Schallstrahlen über dem Gebiet ausbreiten, an.

Dieser Einfluss wird häufig Bodeneffekt genannt. Die Dämpfung durch den Bodeneffekt wird auch als Boden- und Meteorologiedämpfung bezeichnet.

Die Dämpfung nimmt mit der Frequenz zu, d.h. Störgeräusche werden mit größerer Entfernung zur Schallquelle dumpfer wahrgenommen. Es kommt hinzu, dass der Bodeneffekt bei erhöhtem Standpunkt gering ist und umgekehrt. Folglich ist der Einfluss des Bodeneffekts bei Windenergieanlagen geringer als bei bodennahen Schallquellen.

### 3.1.3 Bewuchs und Hindernisse

Bei Bewuchs handelt es sich um bewachsene Flächen. Hoher Bewuchs (Wald, hohes Gebüsch) führt aufgrund von Absorption und vielfacher Streuung zu einem Energieverlust der Schallwellen, d.h. es kommt zu einer Störung der Schallausbreitung. Die Dämpfung durch Bewuchs ist nur gering. Die Ausbreitungsbehinderung der Schallwellen durch Bewuchs ist frequenzabhängig.

Hindernisse wie Gebäude, gewerbliche Freianlagen etc. können durch Reflexionen, Streuungen und Absorption eine zusätzliche merkliche Erhöhung der Dämpfung der Schallausbreitung bewirken. Bei einer WEA ist dies vernachlässigbar.

### 3.1.4 Luftabsorption (Dissipation)

Luft ist ein verlustbehaftetes Medium und verfügt über die Eigenschaften Wärmeleitfähigkeit und Viskosität. Damit ergibt sich bei den Ausbreitungsvorgängen in der Luft eine Zusatzdämpfung durch die Energieübertragung innerhalb des Mediums. Die Schallpegelabnahme infolge der Dissipation ist proportional zu der durchlaufenen Wegstrecke im Medium Luft. Die Schallpegelabnahme nimmt mit der Frequenz zu. Deshalb werden Störgeräusche dumpfer wahrgenommen, je weiter der Immissionsort von der Quelle entfernt ist [14], [15].

Der Einfluss von Nebel, Regen und Schnee ist vorhanden, wird aber vernachlässigt.

## 3.2 Schallimmissionen im Umfeld von Windenergieanlagen

### 3.2.1 Abhängigkeit der Schallimmission vom Abstand zur Windenergieanlage

In welcher Höhe die Schalldruckpegel in der Umgebung von Windenergieanlagen auftreten, ist von folgenden Faktoren abhängig:

- Schallleistungspegels des Anlagentyps,
- Anzahl der Anlagen,
- Lage der Anlage zum Immissionsort,
- Temperaturgradient und
- von der Windrichtung und -geschwindigkeit.

In den folgenden Beispielabbildungen sind die zu erwartenden Beurteilungspegel<sup>4</sup>  $L_{r,A}$  in dB(A) nach [9] an den jeweiligen Immissionsorten in der Umgebung der Windenergieanlagen dargestellt (s. Abbildung 3.2.1 - 1, - 2 und - 3 aus [10]).

In den Beispielen aus [10] wurde davon ausgegangen, dass der Schallleistungspegel der Anlagen 103 dB(A), die Nabenhöhe 80 m und die Höhe des Immissionsortes 5 m (0,5 m vor einem geöffneten Fenster im 1. OG) beträgt. Die Berechnung der Schallausbreitung erfolgte im Zusammenhang mit der TA Lärm nach der DIN ISO 9613, Teil 2. Dabei wurde für die Berechnung des Bodeneffekts das „alternative Verfahren zur Berechnung A-bewerteter Schalldruckpegel“ der DIN ISO 9613, Teil 2, Abschnitt 7.3.2 verwendet. Die meteorologische Korrektur  $C_{met}$  wurde unter dem Ansatz von  $C_0$  gleich 2 dB berücksichtigt. Zudem wurde für die Luftfeuchtigkeit 70 % und für die Lufttemperatur 10 °C angenommen.

---

<sup>4</sup> Der Beurteilungspegel nach [9] wird aus dem Mittelungspegel  $L_{Aeq}$  des zu beurteilenden Geräusches und ggf. aus den Zuschlägen für Ton- und Informationshaltigkeit, Impulshaltigkeit und für Tageszeiten mit erhöhter Empfindlichkeit gebildet. Der gebildete Wert ist zur Kennzeichnung der mittleren Geräuschbelastung während jeder Beurteilungszeit.



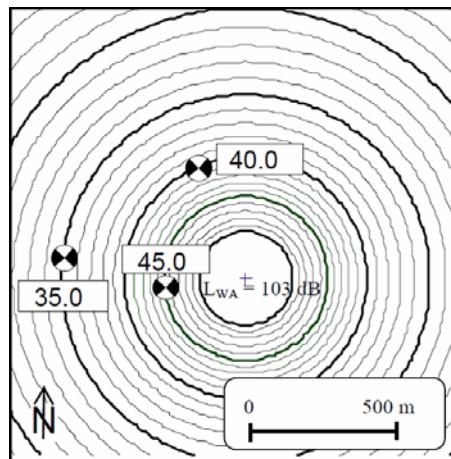


Abbildung 3.2.1 - 1: Kurven gleichen Beurteilungspegels, im Umfeld einer Windenergieanlage [10]

Nach den jeweiligen Berechnungen ergibt sich ein Beurteilungspegel für eine Windenergieanlage in Abhängigkeit vom Abstand zu der Punktschallquelle von:

- 45 dB(A) in ca. 280 m,
- 40 dB(A) in ca. 410 m und
- 35 dB(A) in ca. 620 m.

In den folgenden zwei Abbildungen werden die Kurven gleichen Beurteilungspegels im Umfeld von mehreren Windenergieanlagen dargestellt.

Der Wind kommt in den Abbildungen 3.2.1 - 2 und - 3 hauptsächlich aus der Himmelsrichtung West. Bei mehreren Anlagen ist zu beachten, dass der Mindestabstand zwischen den Anlagen in Hauptwindrichtung<sup>5</sup> das 5 bis 9 -fache und zur Hauptwindrichtung<sup>6</sup> das 3 bis 5 -fache des Rotordurchmessers betragen sollte.

<sup>5</sup> In den Abbildungen kommt der Wind hauptsächlich aus der Himmelsrichtung West. Der Mindestabstand der Anlagen in Hauptwindrichtung beträgt das 5 bis 9 fache des Rotordurchmessers. Das sind die Abstände, bei denen die Anlagen in der Richtung von West nach Ost und umgekehrt aufgestellt sind.

<sup>6</sup> Die Mindestabstände zur Windrichtung sind die Abstände, bei denen die Anlagen von Nord nach Süd und umgekehrt aufgestellt sind.

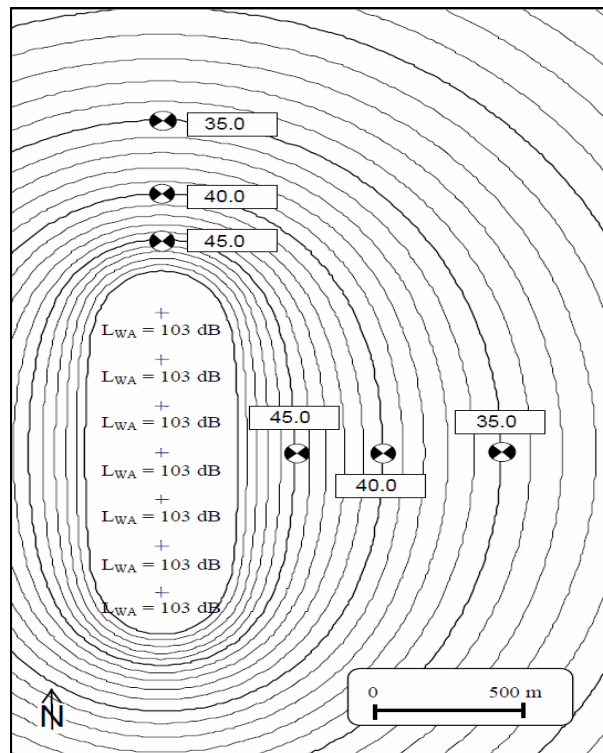


Abbildung 3.2.1 - 2: Beurteilungspegel in Abstand zu 7 Windenergieanlagen [10]

Aus der Abb. 3.2.1 - 2 geht hervor, dass sich ein Beurteilungspegel, der von einer Konzentrationsfläche mit 7 Anlagen bestimmt wird, von:

- 45 dB(A) in ca. 440 m,
- 40 dB(A) in ca. 740 m und
- 35 dB(A) in ca. 1100 m ergibt.

Die aufgeführten Abstände resultieren aus dem Abstand zwischen Immissionsort und nächstgelegener Windenergieanlage. Die Beurteilungspegel gelten für die Immissionsorte in Hauptwindrichtung (West). Außerdem wurden die Mindestabstände zwischen den Anlagen berücksichtigt. Gleiches gilt auch für die Abb. 3.2.1 - 3.

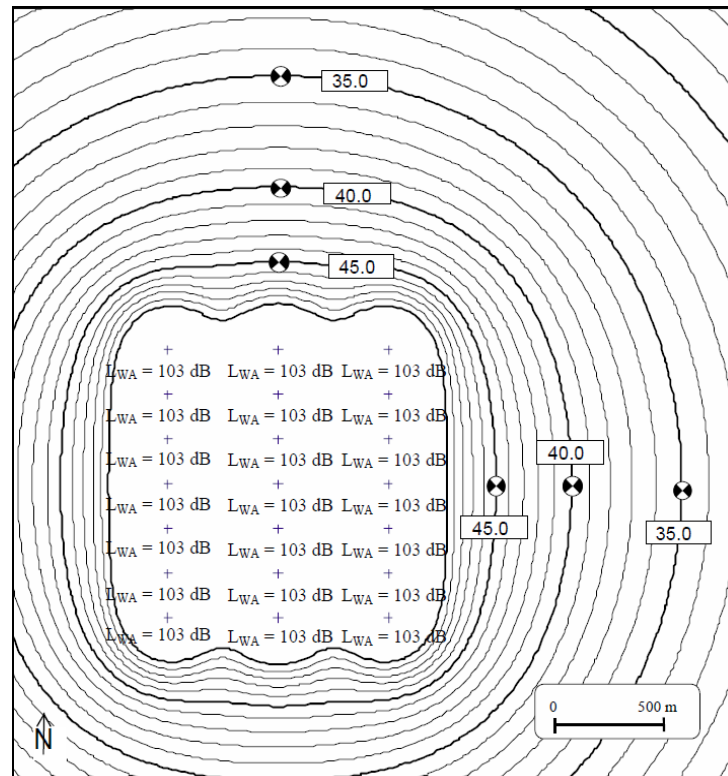


Abbildung 3.2.1 - 3: Beurteilungspegel in der Nachbarschaft, im Umfeld von 21 Windenergieanlagen [10]

Die Abb. 3.2.1 - 3 zeigt die Beurteilungspegelverteilung in der Nachbarschaft eines Windparks mit 21 Windenergieanlagen. Nach diesem Modell wird ein Beurteilungspegel in Abhängigkeit des Abstands verursacht von:

- 45 dB(A) in ca. 500 m,
- 40 dB(A) in ca. 830 m und
- 35 dB(A) in ca. 1300 m.

Anhand der drei Beispielm Modelle ist erkenntlich, dass die Geräuschimmissionen, die im Umfeld solcher Anlagen auftreten, abhängig von der Anzahl der Windenergieanlagen, von der Lage der Anlagen zueinander und der Lage zum Immissionsort sind.

Bei dem Vergleich der drei Abbildungen wird deutlich, dass eine räumliche Konzentration mit gleichen Geräuschquellen und gleicher emittierter Schalleistung zu einer geringfügigeren Geräuschbelastung der Fläche führt. Damit ist die räumliche Konzentration im Vorteil gegenüber den Einzelschallquellen, die im großen Abstand zueinander stehen [11].

### 3.2.2 Infraschall

Von Windenergieanlagen wird Infraschall abgestrahlt und kann messtechnisch nachgewiesen werden. Diese Schallart ist von Menschen akustisch nicht wahrnehmbar, da sie unterhalb der Wahrnehmungsschwelle liegt (vgl. Tabelle 3.2.2 - 1). Der messtechnisch festgestellte Infraschall bei Windenergieanlagen liegt weit unter dieser Schwelle und ist somit nicht schädlich für den Menschen.

In der Tab. 3.2.2 - 1 sind die tiefen Frequenzen mit der dazugehörigen Hörschwelle dargestellt.

Tabelle 3.2.2 - 1: Hörschwellenpegel im Infraschallbereich nach DIN 45680 [16]

Frequenz f in Hz	8	10	12,5	16	20
Hörschwelle in dB	103	95	87	79	71

Die Hörschwelle in dB nimmt zu tieferen Frequenzen hin zu. Zum Beispiel ist bei einer Frequenz von 8 Hz ein Schalldruckpegel von 103 dB erforderlich, damit der Infraschall die Hörschwelle des Menschen überschreitet und mit dem Ohr wahrgenommen werden kann.

### 3.2.3 Windbedingte Fremdgeräusche

Der Wind spielt nicht nur beim Betrieb von Windenergieanlagen eine Rolle, sondern erzeugt auch Blätterrauschen und Turbulenzgeräusche an Häusern. Diese windbedingten Geräusche treten unabhängig von Geräuschen, die von einer Windenergieanlage verursacht werden, auf. Sie sind abhängig vom Bewuchs in der Umgebung des Immissionsortes und von dem Geländeprofil. Sie werden nicht den Schallimmissionen zugeordnet, die von einer Windenergieanlage ausgehen. Nach der TA Lärm werden sie als so genannte "Fremdgeräusche" bezeichnet. Für die Schallmessung an WEA sind deshalb besondere Messvorschriften einzuhalten, um den gemessenen Fremdgeräuschanteil so gering wie möglich zu halten. Es ist auch zu beachten, dass die Schallpegelmaxima der Fremdgeräusche und der Anlagengeräusche meist nicht gleichzeitig auftreten. Das resultiert aus der Böigkeit des Windes, d.h. je nach dem, ob eine Windböe gerade den Messort oder die Anlage erfasst, sind die Geräuschanteile an den Immissionsorten verschieden stark wahrnehmbar. Für eine akustische Verdeckung der Anlagengeräusche durch windbedingte Fremdgeräusche gibt es noch keine allgemeingültigen Erkenntnisse.

Es ist lediglich bekannt, dass bei einer pitch-gesteuerten Anlage eine Verdeckung bei hohen Windgeschwindigkeiten auftreten kann. Bei einer stall-gesteuerten Anlage trifft dieser Effekt nicht ein [17].

Unter einer pitch-gesteuerten Anlage ist eine Anlage zu verstehen, bei der das Geräuschverhalten kontinuierlich mit der Windgeschwindigkeit ansteigt, bis eine bestimmte Nennleistung erreicht wird. Nach dem Erreichen der Nennleistung tritt keine weitere Zunahme der Schallemission mit der weiter ansteigenden Windgeschwindigkeit auf. Die Schallemissionen bleiben konstant. Das Ganze resultiert aus der dynamischen Blatteinstellwinkelverstellung bei diesen Windenergieanlagen. Dabei werden beim Erreichen der Nennleistung die Rotorblätter so verstellt, dass sie dem Wind eine geringere Angriffsfläche bieten und damit wird die aus dem Wind resultierende Leistung begrenzt.

Bei stall-gesteuerten Windenergieanlagen steigen die Schallemissionen bei steigenden Windgeschwindigkeiten weiter an. Die Rotorblätter solcher Anlagen sind starr ausgerichtet. Diese Anlagen werden in dieser Arbeit nicht mit betrachtet.

### 3.3 Geräuscentstehungsmechanismen

Es gibt drei Hauptgeräuschquellen bei Windenergieanlagen, die Geräuschemissionen verursachen.

Als erstes wären die aerodynamischen Geräusche<sup>7</sup>, die von den Rotorblättern ausgehen, zu nennen. Sie entstehen durch Wechselwirkungen zwischen den Rotorblättern und der umströmenden Luft (Turbulenzen). Aus der theoretischen Strömungsakustik und aus praktischen Messungen geht hervor, dass die abgestrahlte Schallintensität mit der Strömungsgeschwindigkeit stark anwächst. Damit nehmen die aerodynamischen Geräusche mit der Erhöhung der Rotordrehzahl stark zu. Um diesen Geräuschtyp zu reduzieren, wurden Rotorblätter mit abgeflachten Hinterkanten entwickelt. Dadurch werden weniger Turbulenzen und geringere Schallemissionen verursacht.

Die zweite Gruppe bilden die mechanisch verursachten Geräuschquellen. Die Komponenten, die die Schallemission mit verursachen sind Getriebe, Generator, Kühllüfter und Hilfsantriebe. Sie können dazu beitragen, dass die entstehenden Geräusche auffällige Einzeltöne enthalten.

---

<sup>7</sup> Aerodynamische Geräusche sind z.B. Geräusche durch die Umströmung des Rotors, Turbulenzgeräusche an der Blatthinterkante durch Verwirbelung der anströmenden Luft und Geräusche durch die Umströmung der Rotorblätter.

Die mechanische Hauptgeräuschquelle ist das Getriebe. Die Generatoremissionen können gegenüber dem Getriebe vernachlässigt werden. Durch lärmarme Aggregate, mögliche Körperschallentkopplung und ausreichend dimensionierte Schallschutzkapseln (Gondel) kann die Geräuschabstrahlung für den gesamten Maschinenbereich meist ausreichend gemindert werden.

Die dritte Hauptgeräuschquelle ist die Schallabstrahlung über den WEA-Mast. Auf Grund der Körperschallübertragung aus dem Maschinenraum wird der Mast zur Abstrahlung von Luftschall angeregt. Die Abstrahlung ist von Masttyp zu Masttyp unterschiedlich und muss auch auf unterschiedliche Art und Weise durch Schallschutzmaßnahmen kompensiert werden. Dabei ist die effektivste Schallschutzmaßnahme die akustische Entkopplung des Maschinenraumes vom Mast mittels elastischer Elemente [11].

## **4 Schallausbreitungsrechnung**

### **4.1 Aufgabenstellung**

In der Diplomarbeit sollen die Möglichkeiten zur Leistungssteigerung durch eine Reduzierung des eingeschränkten Betriebs einer Windenergieanlage mittels einer detaillierten Schallausbreitungsrechnung dargestellt werden. Dazu soll der Einfluss der tatsächlichen Windrichtung und -geschwindigkeit auf die zu erwartenden Schallimmissionen am Immissionsort ermittelt werden. Zudem wird die Richtwirkung der Schallabstrahlung berücksichtigt. Die Ergebnisse werden mit den Werten der gesetzlich festgelegten Mitwind-Situation verglichen.

Im Kapitel 4 werden die Zusammenhänge an einem vereinfachten Modell dargestellt.

## 4.2 Angaben zur Schallimmissionsprognose

### 4.2.1 IMMI als Berechnungsprogramm

Reale Sachlagen, in denen schalltechnische Probleme berechnet werden sollen, sind in den meisten Fällen komplex. Soll z.B. ein Windpark in der Nähe von verschiedenen bebauten Ortschaften (Mischgebiet, Dorfgebiet, Gewerbegebiet usw.) gebaut oder erweitert werden, so ist die Lärmbelastung für jedes infrage kommende Gebäude an jeder Hausseite in jedem Stockwerk zu berechnen. Dabei sind Umgebungseinflüsse wie Reflexion, Beugung und Dämpfung nach DIN ISO 9613, Teil 2 einzubeziehen. Eine solche Aufgabe ist so umfangreich, dass ein Computerprogramm für die Berechnung notwendig ist.

Das Programm benötigt für diese Berechnung ein dreidimensionales Modell des Problembereiches und dessen Umgebung, in dem alle schalltechnisch relevanten Daten wie Schallquellen, Immissionsorte, Bebauung etc. berücksichtigt werden. Oft erfolgt dies anhand vorhandenen Kartenmaterials, das eingescannt und als Hintergrund-Bitmap verwendet werden kann. In vielen Fällen sind auch digitalisierte Kartenmaterialien vorhanden oder es existieren Geoinformationen, deren topographische Daten importiert werden können. Höhendaten, Daten über Reflexionseigenschaften sowie Schallquellen werden danach per Hand eingegeben. Das vollständige Modell ermöglicht vielfältige Berechnungen und die Erstellung von Immissions-Tabellen, Rasterlärmkarten usw.. Außerdem lassen sich sehr leicht schalltechnische Änderungen direkt einarbeiten und deren Auswirkung überprüfen. Am Ende der Berechnung ergeben sich die Beurteilungspegel an den jeweiligen festgelegten Immissionsorten, die mit den Immissionsrichtwerten der TA Lärm zu vergleichen sind. Danach wird beurteilt, ob die Werte eingehalten werden oder nicht. Bei einer Überschreitung der Werte müssen Maßnahmen getroffen werden, die eine Einhaltung der Richtwerte zum Ziel haben.

Es gibt einige verbreitete Programme wie z.B. CADNA, SOUNDPLAN, IMMI, die bei der Berechnung und Modellierung der Schallausbreitung zur Anwendung kommen. In der vorliegenden Arbeit wird für die Berechnung der Schallausbreitung von Windenergieanlagen das Immissionsprognoseprogramm IMMI, Version 2009 - 2 der Firma Wölfel Messsysteme - Software GmbH & Co., Höchberg verwendet.



### 4.2.2 Grundlagen der Schallausbreitungsrechnung

Für die Beurteilung der Lärmsituation wird die TA Lärm verwendet. Sie gibt zwei Verfahren für die Prognose der Geräuschimmissionen an. Zum einen ist das die überschlägige Prognose. Die von einer freien, ungehinderten Schallausbreitung ausgeht. Die Ausbreitungsverluste, die z.B. durch die Luftabsorption, den Boden und durch die Meteorologie verursacht werden, können im Rahmen der überschlägigen Prognose nicht nachgebildet werden. Die Prognose ist für die Vorplanung und in den Fällen, in denen die nach ihr berechneten Beurteilungspegel zu keiner Überschreitung der Immissionsrichtwerte führen, ausreichend. In den anderen Fällen wird die detaillierte Prognose herangezogen. Bei der detaillierten Prognose werden die Ausbreitungsverluste und die Frequenzabhängigkeit mit berücksichtigt. Liegen die Emissionsdaten nur als A-bewertete Schallpegel vor, kann die detaillierte Prognose auch mit diesen Werten nach der DIN ISO 9613, Teil 2 durchgeführt werden.

Des Weiteren kommen die Technische Richtlinie für Windenergieanlagen, die DIN EN 61400, Teil 11, die DIN (E) 45681 und die DIN 45645, Teil 1 für die Berechnung der Lärmsituation zur Anwendung.

#### *DIN ISO 9613, Teil 2 [13] und VDI 2714 [12]*

Die DIN ISO 9613, Teil 2 - Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien - legt Verfahren zur Berechnung der Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien fest.

Nach der Norm [13] werden für jede Punktschallquelle die Immissionspegel für jedes Oktavband bei Mitwind berechnet. Diese Immissionspegel werden einer A-Bewertung unterzogen und unter dem Einbezug der Dämpfungseinflüsse der Schallausbreitung energetisch addiert. Daraus ergibt sich ein Summenpegel unter Mitwindbedingungen, der frequenzabhängig, A-bewertet und über die Zeit gemittelt ist. Nach der [13] kann der für Mitwind ermittelte Pegel auf den Langzeitmittelungspegel durch Anwendung der meteorologischen Korrektur  $C_{\text{met}}$  übertragen werden.

In der Praxis sind aber häufig nur die A-bewerteten Schallleistungspegel bekannt, daher werden die Dämpfungswerte bei 500 Hz verwendet, um eine resultierende Dämpfung abschätzen zu können. Mit dieser Festlegung wird die DIN ISO 9613, Teil 2 eingeschränkt. Die eingeschränkte Norm würde bei einem Vergleich der VDI 2714 [12] bei 500 Hz etwa entsprechen.

*Technische Richtlinie für Windenergieanlagen [20] und DIN EN 61400 [21]*

Nach der technischen Richtlinie werden die Schallemissionswerte für Windenergieanlagen bestimmt. Das Verfahren für die schalltechnische Vermessung beruht auf das Messverfahren nach DIN EN 61400, Teil 11. Nach dem Messverfahren werden die Messungen im Nahbereich der WEA angewandt, um durch die Schallausbreitung bedingte Fehler zu vermeiden. Jedoch in ausreichender Entfernung, um die WEA als Punktschallquelle betrachten zu können. Zudem beinhalten die Verfahren: die Festlegung und Angabe der Messpunkte bei der Geräuschemessung, die Anforderungen an die Erfassung akustischer und meteorologischer Daten sowie relevante Betriebsdaten der WEA, die Auswertung der Messdaten und den Inhalt des Messberichts.

Die Technische Richtlinie umfasst außerdem Mess- bzw. Auswertemethoden zur Ermittlung des immissionsrelevanten Schallleistungspegels sowie Analyseverfahren zur Bestimmung der Ton- und Impulshaltigkeit des abgestrahlten Geräusches. Für die Immissionsprognose ist grundsätzlich der mittlere immissionswirksame Schallleistungspegel sowie nach der technischen Richtlinie der zum höchsten Beurteilungspegel führt, anzuwenden.

*DIN (E) 45681 [18] und DIN 45645, Teil 1 [19]*

Bei der Immissionsprognose müssen die Zuschläge für Ton- und Informationshaltigkeit  $K_T$  sowie Impulshaltigkeit  $K_I$  des abgestrahlten Geräusches berücksichtigt werden. Für die Zeiten, in denen in den zu beurteilenden Geräuschemissionen ein oder mehrere Töne hervortreten oder in denen das Geräusch Informationshaltig ist, ist für den Zuschlag je nach Auffälligkeit der Wert 3 oder 6 dB anzusetzen. In den Zeiten, in denen das zu beurteilende Geräusch Impulse enthält, ist für den Zuschlag je nach Störwirkung der Wert 3 oder 6 dB anzugeben. Dieser kann messtechnisch nach der TA Lärm bestimmt werden. Für Anlagen, die keine hervortretenden Töne beinhalten oder Informationshaltig sind sowie keine Impulse aufweisen, sind die jeweiligen Zuschläge mit dem Wert von 0 dB festzulegen.

### 4.2.3 Technische Daten der verwendeten Windenergieanlage

Für das Immissionsprognosemodell wird eine typische Windanlage mit folgenden technischen und immissionsrelevanten Daten, wie sie in Tab. 4.2.3 - 1 dargestellt sind, angenommen.

Tabelle 4.2.3 - 1: Betriebsdaten der verwendeten WEA

Nabenhöhe	125 m
Turmdurchmesser	4,22 m
Rotordurchmesser	114 m
Rotortyp	3 -flügeliger Rotor
Leistungsregelung	pitch-Steuerung
Nennleistung (100%)	4.500 kW
Drehzahl	variabel, 8 - 13 U/min
Wind-Einschaltgeschwindigkeit	4 m/s
Wind-Abschaltgeschwindigkeit	20 - 24 m/s
Garantierter Schallleistungspegel	106 dB(A)

Für die Schallemission der Windenergieanlage wird ein Schallleistungspegel  $L_W$  von 106 dB(A) für Tag und Nacht bei 95 % Nennleistung<sup>8</sup> von 4.250 kW angenommen.

Bei den folgenden Abschnitten wird eine Ton- und Informationshaltigkeit sowie Impulshaltigkeit der Geräuschabstrahlung ausgeschlossen. Nach dem Abschnitt 4.2.2 sind die Zuschläge  $K_T$  und  $K_I$  mit dem Wert 0 dB anzusetzen.

Im Abschnitt 4.3.2 werden über das Schallimmissionsprognoseprogramm IMMI, welches nach den in Abschnitt 4.2.2 aufgeführten gesetzlichen und normativen Grundlagen rechnet, die Schallimmissionen am jeweiligen Immissionsort berechnet.

---

<sup>8</sup> Die Hersteller gehen davon aus, dass der maximale Schallleistungspegel schon bei 95 % Nennleistung und bei einer Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe zwischen 10 und 12 m/s erreicht wird. Über diesem Betriebspunkt hinaus werden die Anlagen auf pitch-Steuerung umgestellt. Daher wird z.B. in der Technische Richtlinie für Windenergieanlagen und in der DIN 61400, Teil 11 bei messtechnischen Bezügen von dem 95%-Wert der Nennleistung ausgegangen.

### 4.3 Schallimmissionsprognosemodelle

#### 4.3.1 Allgemeine Modellbeschreibung

In dieser Arbeit wird ein vereinfachtes Modell einer Windenergieanlage betrachtet. Die Gondel, in der sich die Maschinen befinden, wird als Punktschallquelle zusammengefasst dargestellt (s. Abbildung 4.3.1 - 1).

Bei dem Modell wird von einer Windenergieanlage mit einer Nabenhöhe von 125 m, einen Rotordurchmesser von 114 m und von einem Schallleistungspegel von 106 dB(A) bei Tag und Nacht ausgegangen (vgl. Abschnitt 4.2.3). Die Immissionsorte sind dabei 1330 m von der Schallquelle entfernt. Die Entfernungen zu den Orten sind frei gewählt worden. Die Immissionsorte (IO) sind in den Richtungen  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  und  $270^\circ$  positioniert. Die Richtungsangaben in Grad sind aus Literaturangaben wie z.B. aus [21] entnommen und dienen einer Vereinfachung der Modelldarstellung ( $0^\circ$  ist die Mitwindwetterlage). Die Immissionsorte liegen jeweils in einer Höhe von 8 m (z.B. Fenster im 2. OG eines Wohnhauses). Der Wind kommt stets aus der  $180^\circ$ -Richtung. Die Windenergieanlage ist demzufolge in Richtung  $180^\circ$  ausgerichtet.

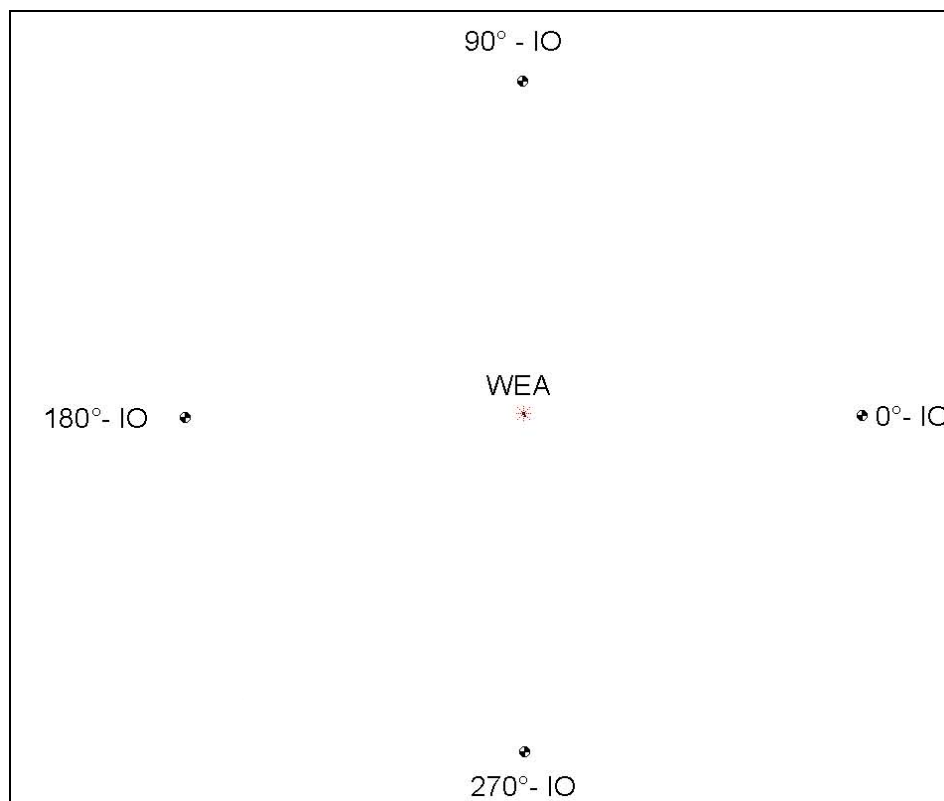


Abbildung 4.3.1 - 1: Vereinfachtes Modell einer Windenergieanlage mit 4 Immissionsorten ( $0^\circ$  bis  $270^\circ$ ) und bei ebenen Gelände (Maßstab:  $1\text{ cm} \triangleq 298,9\text{ m}$ )

### 4.3.2 Detaillierte Schallausbreitungsrechnung am Standort

#### 4.3.2.1 Gesetzlich festgelegte Mitwind - Situation

Bei dem Modell in Abschnitt 4.3.1 wird mit dem Berechnungsprogramm IMMI für die gesetzlich festgelegte Mitwind-Situation in allen Immissionsrichtungen nach [13] gerechnet. Dabei wird von folgenden Voraussetzungen ausgegangen:

- es handelt sich um eine Punktschallquelle,
- Schall breitet sich in alle Richtungen von der Schallquelle zum Immissionsort bei Mitwind aus,
- es erfolgt keine Windrichtungsvorgabe (Windrose),
- es herrscht stets leichter Mitwind (Windgeschwindigkeit im Bereich zwischen 1 - 5 m/s in 3 - 11 m Höhe über dem Boden) und
- Beurteilungspegel nach TA Lärm für den lautesten Tag im Jahr.

Der Schallleistungspegel der WEA in Abb. 4.3.1 - 1 liegt in der A-Bewertung vor. Daher werden wie in Abschnitt 4.2.2 bereits erwähnt die Dämpfungen bei der Schallausbreitungsrechnung bei 500 Hz angegeben. Dadurch wird die [12] eingeschränkt und entspricht etwa der VDI 2714 bei 500 Hz (s. Abschnitt 4.2.2). Auf Grund dessen kann der Immissionspegel an den jeweiligen Immissionsorten unter Berücksichtigung einiger Faktoren nach [12] berechnet werden.

$$L_S = [L_W + DI + K_0] - [D_S + \sum D] \text{ [dB(A)]} \quad (4.1)$$

mit

- $L_S$  - Schalldruckpegel bei Mitwind in dB(A) (ungünstiger Fall im Sinne des Immissionsschutzes),
- $L_W$  - Schallleistungspegel der Punktschallquelle in dB(A),
- $DI$  - Richtwirkungsmaß in dB (tritt hier bei Mitwindwetterlage nicht auf,  $DI = 0$  dB),
- $K_0$  - Raumwinkelmaß für Punktschallquellen (für Halbkugel  $K_0 = 3$  dB),
- $D_S$  - Abstandsmaß in dB und
- $\sum D$  - Dämpfungsterm in dB.

$K_0$  ist das Raumwinkelmaß und wird nach der Gleichung 4.2 wie folgt berechnet:

$$K_0 = 10 \lg \left( \frac{4\pi}{\Omega} \right) \text{ [dB]}. \quad (4.2)$$

mit

$\Omega$  - Raumwinkel (nach VDI 2714, Tabelle 2 gilt für eine Halbkugel immer  $\Omega = 2 \pi$ )

Die Windenergieanlage wird als Halbkugel angenommen, da die Immissionsorte 1330 m von der Anlage entfernt liegen [35]. Bei Immissionsorten, die im Nahfeld der Anlage liegen, gilt die Windenergieanlage als Vollkugel.

In Gleichung 4.1 ist  $D_s$  das Abstandmaß in dB. Es wird auch als geometrische Ausbreitungsdämpfung bezeichnet. Sie berücksichtigt die kugelförmige Schallausbreitung von einer Punktschallquelle im Freifeld. Für das Abstandsmaß gilt Gleichung 4.3:

$$D_s = \left[ 20 \cdot \lg \left( \frac{s_m}{s_0} \right) + 11 \right] \text{ [dB]} \quad (4.3)$$

mit

$s_m$  - Abstand zwischen Schallquelle und Empfänger in m (Tab. 4.3.2.1 - 1) und

$s_0$  - Bezugsabstand in m ( $s_0 = 1 \text{ m}$ ).

Der Dämpfungsterm aus Gleichung 4.1 setzt sich aus folgenden Gliedern zusammen:

$$\sum D = D_L + D_{BM} + D_D + D_G + D_e \text{ [dB]}. \quad (4.4)$$

mit

$D_L$  - Luftabsorptionsmaß in dB,

$D_{BM}$  - Boden- und Meteorologiedämpfungsmaß in dB,

- $D_D$  - Bewuchsdämpfungsmaß in dB (im Folgenden nicht berücksichtigt),
- $D_G$  - Bebauungsdämpfungsmaß in dB (im Folgenden nicht berücksichtigt) und
- $D_e$  - Einfügungsdämpfungsmaß eines Schallschirmes in dB (im Folgenden nicht berücksichtigt).

Aus Gleichung 4.4 sind die Terme wie im Folgenden aufgeführt zu berechnen:

$D_L$  steht für die Dämpfung durch Luftabsorption während der Schallausbreitung.

$$D_L = [\alpha_L \cdot s_m] \text{ [dB]} \quad (4.5)$$

mit

- $s_m$  - Abstand zwischen Schallquelle und Empfänger in m (Tab. 4.3.2.1 - 1) und
- $\alpha_L$  - Absorptionskoeffizient in dB/m ( $\alpha_L = 0,002$  dB/m nach [12], Tab. 3 bei 10°C, 70 % rel. Feuchte und bei einer mittleren Frequenz von 500 Hz).

Für die Boden- und Meteorologiedämpfung  $D_{BM}$  gilt: Der A-bewertete Schalldruckpegel am Immissionsort ist von Interesse. Der Schallstrahl breitet sich über porösem Boden (mit Bewuchs bedecktem Boden bzw. für sonstiges Pflanzenwachstum geeignetem Boden) aus. Es handelt sich um kein reines Geräusch. Somit wird  $D_{BM}$  nach Gleichung 4.6 berechnet.

$$D_{BM} = 4,8 - \left( \frac{2h_m}{s_m} \right) \cdot \left[ 17 + \left( \frac{300}{s_m} \right) \right] \text{ [dB]} \quad (4.6)$$

mit

- $h_m$  - mittlere Höhe des Schallausbreitungsweges über dem Boden (gebildet aus der Quellenhöhe von 125 m und der Höhe des Aufpunkts von 8 m:

$$h_m = \frac{125m - 8m}{2} = 58,5 \text{ m})$$

In dem Modell aus Abschnitt 4.3.1 ist die meteorologische Korrektur  $C_{\text{met}}$  bei einem Abstand von 1330 m gleich 0 dB. Da der Abstand das 10 -fache der Summe aus der Quellenhöhe und der Höhe des Aufpunkts beträgt (vgl. Abschnitt 8 der [13]).

Der daraus resultierende Gesamt-Immissionspegel  $L_S$  der Schallquelle an einem Immissionsort ergibt sich aus den Gleichungen 4.1 bis 4.6. Es ist zu beachten, dass die Werte für alle Immissionsorte gelten, da sie in gleichen Abständen angeordnet sind.

Tabelle 4.3.2.1 - 1: Immissionspegel an den Orten  $0^\circ$  bis  $270^\circ$  für Tag und Nacht

IO	$L_W$	s	$K_0$	$D_S$	$D_{BM}$	$D_L$	$L_{S, \text{Tag}}$	$L_{S, \text{Nacht}}$
$0^\circ - 270^\circ$	106 dB(A)	1330 m	3 dB	73,5 dB	3,3 dB	2,7 dB	29,0 dB(A)	29,0 dB(A)

Die Zusatzbelastung beträgt im gewählten Beispiel tags und nachts rund 29 dB(A). Die zulässige Zusatzbelastung für die Nacht wird mit kleiner gleich 28 dB(A) für die Immissionsorte bei  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  und  $180^\circ$  und mit kleiner gleich 29 dB(A) für  $270^\circ$  angenommen. Aus der Tab. 4.3.2.1 - 1 geht hervor, dass es nachts bei einem Immissionspegel von rund 29 dB(A) zu einer Überschreitung der zulässigen Zusatzbelastung an den Immissionsorten bei  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  und  $180^\circ$  um 1 dB kommt. Folglich müssen Schallschutzmaßnahmen für die Nachtstunden getroffen werden, wie z.B. die Reduzierung der Betriebsdauer bei Volllastbetrieb oder die Begrenzung der Drehzahl für Teillastbetrieb mit geringerer Leistung.

Die Einschränkungen zur Minderung der Schallimmissionen und der damit verbundenen Senkung des Schallleistungspegels sind meist zu hoch angesetzt. Das liegt daran, dass bei normgerechter Berechnung die Mitwind-Situation in jeder Ausbreitungsrichtung betrachtet wird. Die Werte werden für den lautesten Tag im Jahr angegeben und einige Faktoren, die in der Realität vorhanden sind, werden nicht berücksichtigt.

Im Folgenden soll aufgezeigt werden, welchen Einfluss die einzelnen Faktoren haben, die zusätzlich zur gesetzlich festgelegten Mitwind-Situation berücksichtigt werden könnten.



#### **4.3.2.2 Möglichkeiten zur Leistungssteigerung von Windenergieanlagen**

In den folgenden Abschnitten sollen die Möglichkeiten zur Leistungssteigerung bei betriebseingeschränkten Windenergieanlagen durch Minderung des berechneten Immissionspegels aufgezeigt werden. Das heißt, es wird der Einfluss der Faktoren, die nicht in gesetzlichen und normativen Vorgaben berücksichtigt werden, wie z.B. Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Richtcharakteristik, dargestellt.

Durch die Berücksichtigung sollen die Pegeldifferenzen bzw. die Spanne für die Leistungssteigerung verdeutlicht werden.

Zur Untersuchung des Einflusses der Windrichtung und -geschwindigkeit auf die Schallabstrahlung von Windenergieanlagen werden im Abschnitt 4.3.2.2.1 und 4.3.2.2.2 tatsächliche Winddaten verwendet.

##### **4.3.2.2.1 Berücksichtigung der Windrichtung**

Für das Modell in Abb. 4.3.2.2.1 - 1 wird festgelegt, dass der Wind in Richtung  $0^\circ$  weht. Das entspricht der Gegenwind-Situation zur Schallausbreitungsrichtung für den Immissionsort bei  $180^\circ$ . Somit würde bei einem Wind aus  $180^\circ$  und in Bezug auf die Schallausbreitungsrichtung einer Punktschallquelle, bei einem Immissionsort bei  $180^\circ$  die Gegenwind-Situation, bei einem Immissionsort bei  $90^\circ$  bzw.  $270^\circ$  die Querwind-Situation und bei einem Immissionsort bei  $0^\circ$  die Mitwind-Situation eine größere Rolle spielen. Da der Wind aus unterschiedlichen Richtungen wehen kann, müssen an den Immissionsorten alle Windsituationen ( $0^\circ < \text{Mitwind} < 45^\circ$ ,  $45^\circ < \text{Querwind} < 135^\circ$  und  $135^\circ < \text{Gegenwind} < 180^\circ$ ) betrachtet werden. Außerdem wird eine gleichförmige, ebene Windbewegung angenommen, die an der WEA und an den Immissionsorten gleich ist.

Bei der Betrachtung der Windsituationen an den Immissionsorten wird die Windgeschwindigkeit  $v_H$  in Nabenhöhe der Windenergieanlage konstant gehalten, hier mit einer Geschwindigkeit von 7,4 m/s. Außerdem werden die Immissionsorte in den Richtungen  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  und  $180^\circ$  zur Schallquelle betrachtet, da es an den Standorten nach Abschnitt 4.3.2.1 zu Überschreitungen der zulässigen Immissionspegel kommt. Der Immissionsort bei  $270^\circ$  wird aus Symmetriegründen zu dem Immissionsort bei  $90^\circ$  und aufgrund der Einhaltung der zulässigen Zusatzbelastungen nicht mit betrachtet.

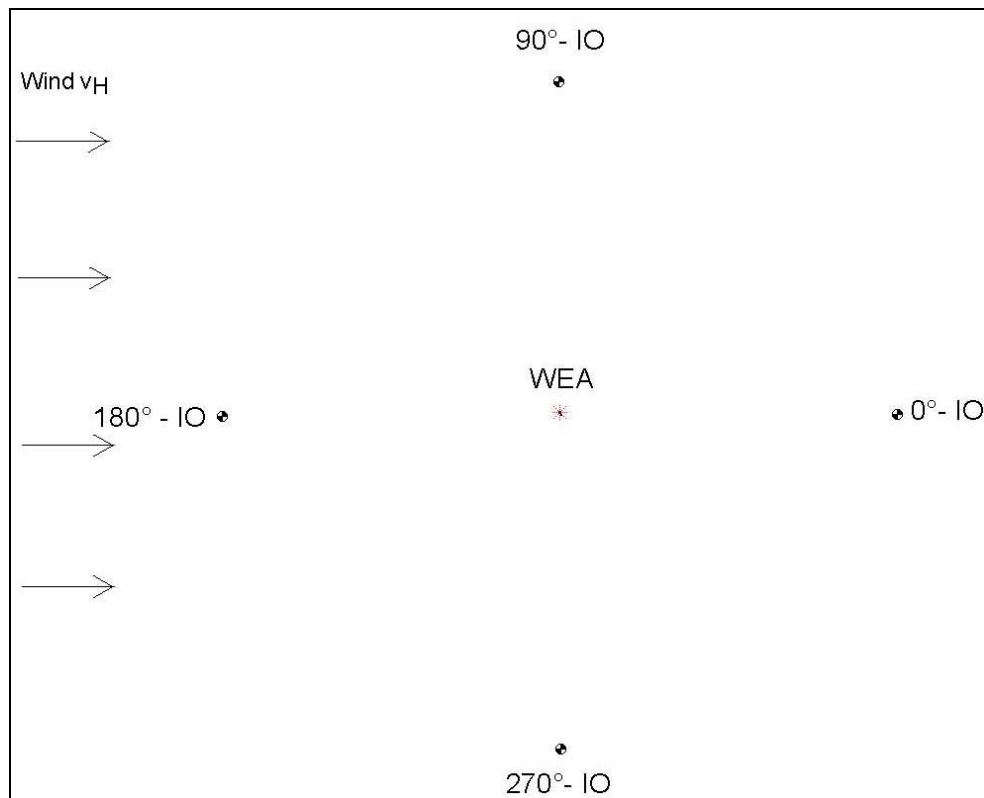


Abbildung 4.3.2.2.1 - 1: Schallausbreitungsmodell mit 4 Immissionsorten unter Berücksichtigung der Windrichtung, Wind weht in Richtung 0° (Maßstab: 1 cm  $\triangleq$  298,9 m)

Um den Einfluss der Windsituationen (Mitwind, Querwind und Gegenwind) an den Immissionsorten aufgrund der Berücksichtigung der Windrichtung untersuchen zu können, muss die auftretende Dämpfung<sup>9</sup>  $D_{W,r}$  in 10 m Höhe über die Abstandsänderung durch den Wind von der Schallquelle zum Immissionsort berechnet werden. Die Dämpfungswerte werden in einer Höhe von 10 m ermittelt, da die gesetzlich festgelegte Mitwind-Situation nach [13] von leichtem Mitwind bei maximal 5 m/s in 10 m Höhe ausgeht mit der die berechneten Dämpfungswerte verglichen werden. Für die Berechnung werden die Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe benötigt. Deshalb werden die Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe ( $v_H$ ) auf die Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe ( $v_{p,10}$ ) nach der Gleichung A.23 im Anhang A umgerechnet (vgl. Tabelle B - 2). Die Berechnung der auftretenden Dämpfung  $D_{W,r}$  in 10 m Höhe wird anhand einer Skizze und dem dazugehörigen Rechenweg, die im Anhang A beschrieben sind, erläutert.

<sup>9</sup> Bei der Berücksichtigung der Windrichtung und -geschwindigkeit wird die auftretende Dämpfung mit  $D_{W,r}$  in dB gekennzeichnet. Die Dämpfung ist abhängig von der Windrichtung und -geschwindigkeit bei der der Schallstrahl einen bestimmten Weg  $r$  zum Immissionsort zurücklegt. Die Dämpfung vermindert oder erhöht den Immissionspegel um einen Wert.

In der Tab. B - 1 im Anhang B sind die berechneten Dämpfungswerte für alle Windsituationen bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe und bei einem Abstand von 1330 m von der Schallquelle zum Immissionsort aufgeführt.

Aus der Tab. B - 2 im Anhang B geht hervor, dass die konstant gehaltene Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe von 7,4 m/s der Windgeschwindigkeit von 5 m/s in 10 m Höhe entspricht. Damit können die berechneten Dämpfungswerte für 5 m/s in 10 m Höhe für alle Windsituationen ( $0 < \text{Mitwind} < 45^\circ$ ,  $45 < \text{Querwind} < 135^\circ$  und  $135 < \text{Gegenwind} < 180^\circ$ ) in der Tab. 4.3.2.2.1 - 1 dargestellt werden. Der Dämpfungswert von 0,13 dB bei  $0^\circ$  wird bereits von der gesetzlichen Auslegung unter Mitwindbedingungen mit berücksichtigt.

Tabelle 4.3.2.2.1 - 1: Darstellung der Dämpfungen  $D_{W,r}$  bei einer Geschwindigkeit von 5 m/s in 10 m Höhe und in einem Abstand  $r$  von 1330 m zu den Immissionsorten

Windsituation	Winkel in Grad	$D_{W,r}$ in dB bei 5 m/s
Mitwind	0	0,13
	22,5	0,12
Querwind	45	0,09
	67,5	0,05
	90	0
	112,5	- 0,05
Gegenwind	135	- 0,09
	157,5	- 0,12
	180	- 0,13

Des Weiteren werden in der Abb. 4.3.2.2.1 - 2 die Dämpfungen  $D_{W,r}$  aller Windsituationen ( $0^\circ < \text{Mitwind} < 45^\circ$ ,  $45^\circ < \text{Querwind} < 135^\circ$ ,  $135^\circ < \text{Gegenwind} < 180^\circ$ ) aus der vorhergehenden Tabelle nochmals grafisch dargestellt.

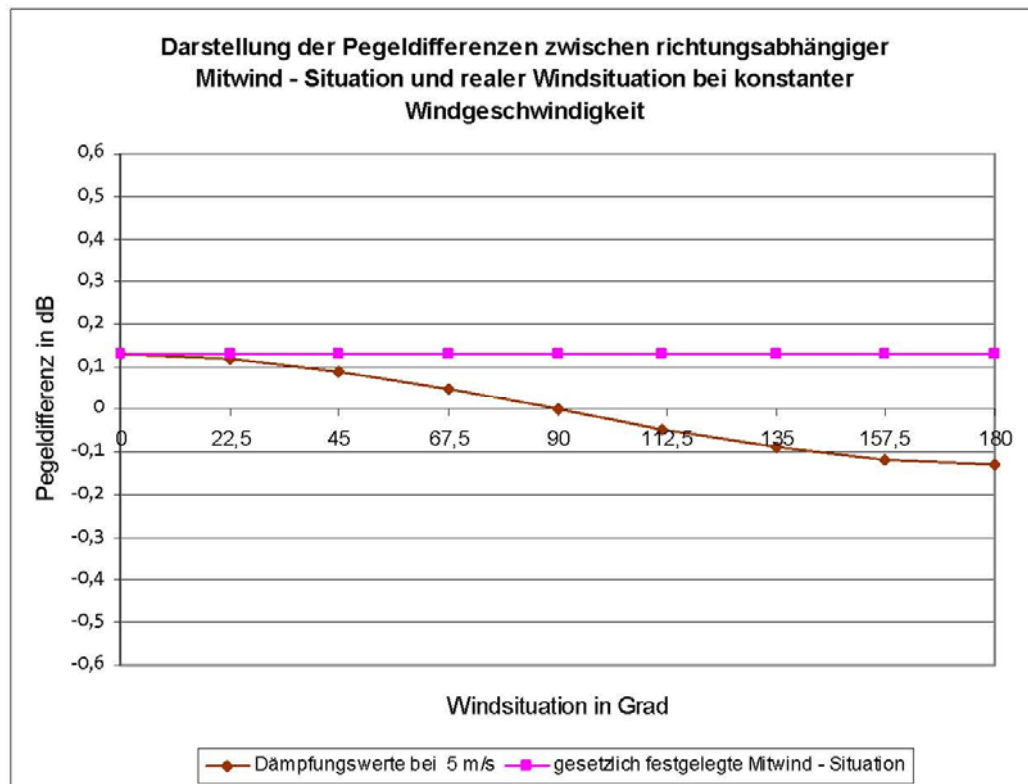


Abbildung 4.3.2.2.1 - 2: Darstellung der Pegeldifferenzen zwischen richtungsabhängiger Mitwind-Situation und realer Windsituation bei konstanter Windgeschwindigkeit, bei einem Abstand  $r$  von 1330 m zu den Immissionsorten

In der Abb. 4.3.2.2.1 - 2 werden die berechneten Dämpfungen mit dem Dämpfungswert von 0,13 dB der gesetzlich festgelegten Mitwind-Situation verglichen. Der Wert von 0,13 dB bleibt bei der gesetzlichen Auslegung über alle Mitwindrichtungen nach [13] konstant, da keine Windrichtung berücksichtigt wird. Die berechneten Werte weichen von dem gesetzlich festgelegten Wert bei Mitwind ab. Es ergeben sich zwischen den beiden Darstellungen Pegeldifferenzen<sup>10</sup>, bei Mitwind liegt der Wert zwischen 0 und 0,04 dB, bei Querwind zwischen 0,04 bis 0,22 dB und bei Gegenwind zwischen 0,22 bis 0,26 dB.

Zusätzlich auftretende Effekte werden in dieser Arbeit nicht mit betrachtet.

Im Abschnitt 4.4 werden die Ergebnisse der tatsächlichen Windrichtung mit der gesetzlich festgelegten Mitwind-Situation verglichen.

<sup>10</sup> Bei der Berücksichtigung von tatsächlichem Wind erhöhen oder vermindern die Dämpfungen den Immissionspegel um einen Wert. Dadurch weicht der Immissionspegel bei tatsächlichem Wind von dem nach der normgerechten Berechnung ab. Diese Abweichung entspricht der Pegeldifferenz in dB.

#### 4.3.2.2.2 Berücksichtigung der Windgeschwindigkeit

Bei der Berücksichtigung von tatsächlichen Windgeschwindigkeiten wird von einem Geschwindigkeitsbereich von 4 - 20 m/s in Nabenhöhe ausgegangen. Da die Windenergieanlagen in der Regel bei 4 m/s eingeschaltet und ab 20 m/s abgeschaltet werden. Um die Ergebnisse bei tatsächlichen Windgeschwindigkeiten mit denen der gesetzlich festgelegten Mitwind-Situation der DIN ISO 9613, Teil 2 vergleichen zu können, muss die Windgeschwindigkeit  $v_H$  wie in Abschnitt 4.3.2.2.1 bereits erwähnt auf die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe ( $v_{p,10}$ ) umgerechnet werden. Daraus ergeben sich Windgeschwindigkeiten von 3 bis 13 m/s in 10 m Höhe, bei denen die Windenergieanlage im Betrieb ist. In Tab. 4.3.2.2.2 - 1 sind die entsprechenden Windgeschwindigkeiten, in der die Anlage betrieben wird, dargestellt. Die Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe entsprechen den gegenübergestellten Werten in Nabenhöhe bei 125 m.

Tabelle 4.3.2.2.2 - 1: Darstellung der entsprechenden Windgeschwindigkeiten in verschiedenen Höhen, bei denen die WEA in Betrieb ist

$V_{p,10}$ in m/s	$v_H$ in m/s
1	1,5
2	2,9
3	4,4
4	5,9
5	7,4
6	8,8
7	10,3
8	11,8
9	13,2
10	14,7
11	16,2
12	17,6
13	19,1
14	20,6
15	22,1
16	23,5

Die Dämpfungen  $D_{W,r}$ , die sich für die Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe ergeben sind in Tabelle B - 1 im Anhang B dargestellt.

Bei der Betrachtung des Einflusses der Windgeschwindigkeit wird eine Windrichtung und eine der daraus resultierenden Windsituationen über mehrere Windgeschwindigkeiten beibehalten. Bei dem Modell wird die Mitwind-Situation bei einem Winkel von  $0^\circ$  gewählt, da die Dämpfungswerte in dem Winkelbereich von  $0^\circ$  bis  $45^\circ$  bei  $0^\circ$  am größten sind. In der Tab. 4.3.2.2.2 - 2 sind die Dämpfungen der Mitwind-Situation bei Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe aufgeführt.

Tabelle 4.3.2.2.2 - 2: Darstellung der Dämpfungen  $D_{W,r}$  bei konstanter Windsituation (bei  $0^\circ$  der Mitwindlage), bei variabler Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe und bei einem Abstand  $r$  von 1330m zum Immissionsort

Wind-situation	Winkel in Grad	Dämpfung $D_{W,r}$ in dB bei $v_{p,10}$ in m/s										
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Mitwind	0	0,08	0,10	0,13	0,15	0,18	0,20	0,23	0,26	0,28	0,29	0,32

Nach Gleichung A.26 im Anhang A wird für die 95 % Nennleistung von 4.250 kW aus Abschnitt 4.2.3 eine Windgeschwindigkeit von 11,31 m/s in Nabenhöhe, was einer Windgeschwindigkeit von 7,66 m/s in 10 m Höhe entspricht, berechnet. Oberhalb der Windgeschwindigkeit von 7,66 m/s begrenzt die WEA über die pitch-Steuerung die Drehzahl. Dadurch steigt der erreichte Schallleistungspegel von 106 dB(A) bei 95 % Nennleistung nicht weiter an. Er bleibt konstant. Der sich ergebende Immissionspegel von 29 dB(A) geht unter gesetzlich festgelegten Bedingungen aus Tab. 4.3.2.1 - 1 für die 95 % Nennleistung und für 5 m/s in 10 m Höhe hervor. Nach [13] wird ein konstanter Immissionspegel für einen Windgeschwindigkeitsbereich von 3 bis 5 m/s in 10 m Höhe angegeben.

Bei der Berücksichtigung der Windgeschwindigkeit wird der Immissionspegel von 29 dB(A) (aus Abschnitt 4.3.2.1) immer um die jeweilige berechnete Dämpfung  $D_{W,r}$ , wie in der Tab. 4.3.2.2.2 - 3 bzw. in der dazugehörigen Darstellung 4.3.2.2.2 - 1 ersichtlich, gemindert bzw. erhöht.

Tabelle 4.3.2.2.2 - 3: Darstellung der Dämpfungen  $D_{W,r}$  und die sich daraus ergebenden Immissionspegel bei einem Winkel von  $0^\circ$  (Mitwindwetterlage), bei Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe und bei einem Abstand  $r$  von 1330 m zum Immissionsort

Windgeschwindigkeit bei 10 m in m/s	Dämpfung $D_{W,r}$ in dB	Immissionspegel $L_s$ in dB(A)
3	0,08	28,36
4	0,10	28,44
5	0,13	28,54
6	0,15	28,67
7	0,18	28,82
8	0,20	29,20
9	0,23	29,43
10	0,26	29,69
11	0,28	29,97
12	0,29	30,26
13	0,32	30,58

Daraus kann die Pegeldifferenz zwischen berechneter und gesetzlich festgelegter Mitwind-Situation abgeleitet werden.

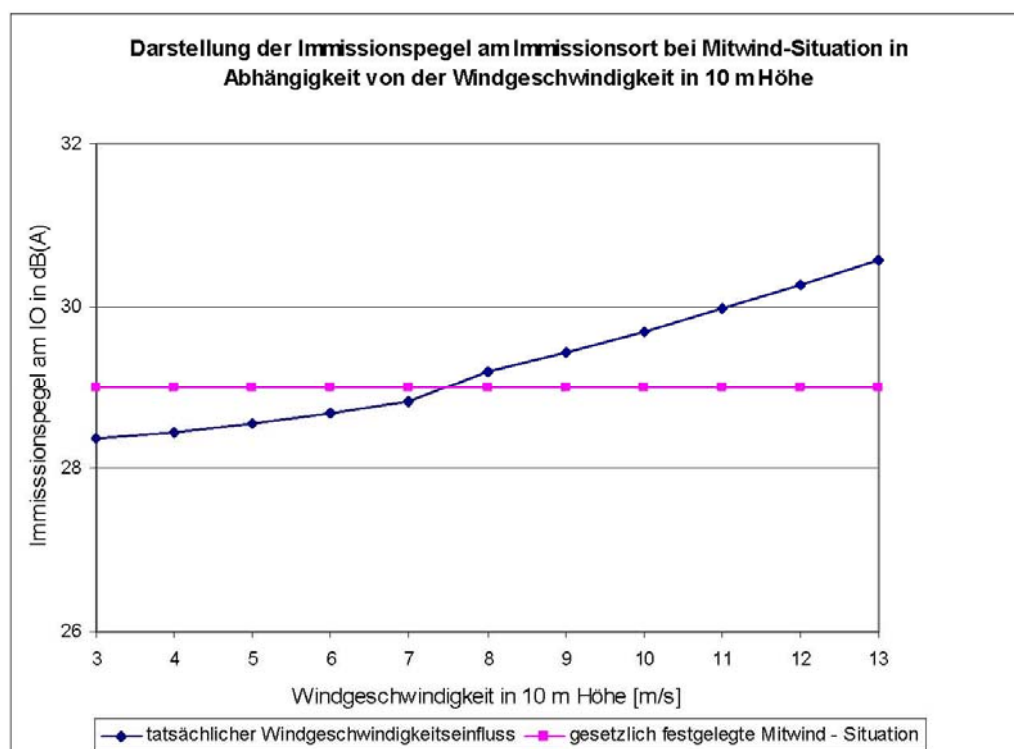


Abbildung 4.3.2.2.2 - 1: Darstellung der Immissionspegel am Immissionsort bei Mitwind-Situation in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe und bei einem Abstand von 1330 m zum Immissionsort

In Abb. 4.3.2.2.2 - 1 führen die berechneten Dämpfungen bei einer Geschwindigkeit von 3 bis 7,66 m/s zu einer Minderung des Immissionspegels. Unterhalb von 3 m/s ist die Anlage nicht in Betrieb. Oberhalb der Windgeschwindigkeit von 7,66 m/s kommt es zu einer Erhöhung des Immissionspegels. Die berechneten Dämpfungen führen nur bis zu einer Geschwindigkeit von 13 m/s in 10 m Höhe zu einer Erhöhung des Immissionspegels. Bei Windgeschwindigkeiten von mehr als 13 m/s wird die WEA abgebremst um Schäden an der WEA zu vermeiden.

Die sich ergebenden Pegeldifferenzen in Abb. 4.3.2.2.2 - 1 liegen zwischen 0,01 und 1,58 dB oberhalb der 7,66 m/s und zwischen 0,01 und 0,64 dB unterhalb der 7,66 m/s.

In unserem Modell soll nun der Dämpfungseinfluss bei 25 % und 50 % der Nennleistung dargestellt werden. Bei einem Betrieb bei den jeweiligen Nennleistungen soll verdeutlicht werden, wie groß der Effekt zwischen tatsächlichem Wind und gesetzlich festgelegter Mitwind-Situation ist. Dabei muss die Leistung bei der jeweiligen Windgeschwindigkeit berechnet werden. Die Berechnungen werden im Anhang A mit den dazugehörigen Tab. B - 3 und B - 4 erläutert. Demnach kann für die Abb. 4.3.2.2.2 - 1 die Pegeldifferenz für die einzelnen Nennleistungen der WEA in Abb. 4.3.2.2.2 - 2 dargestellt werden.

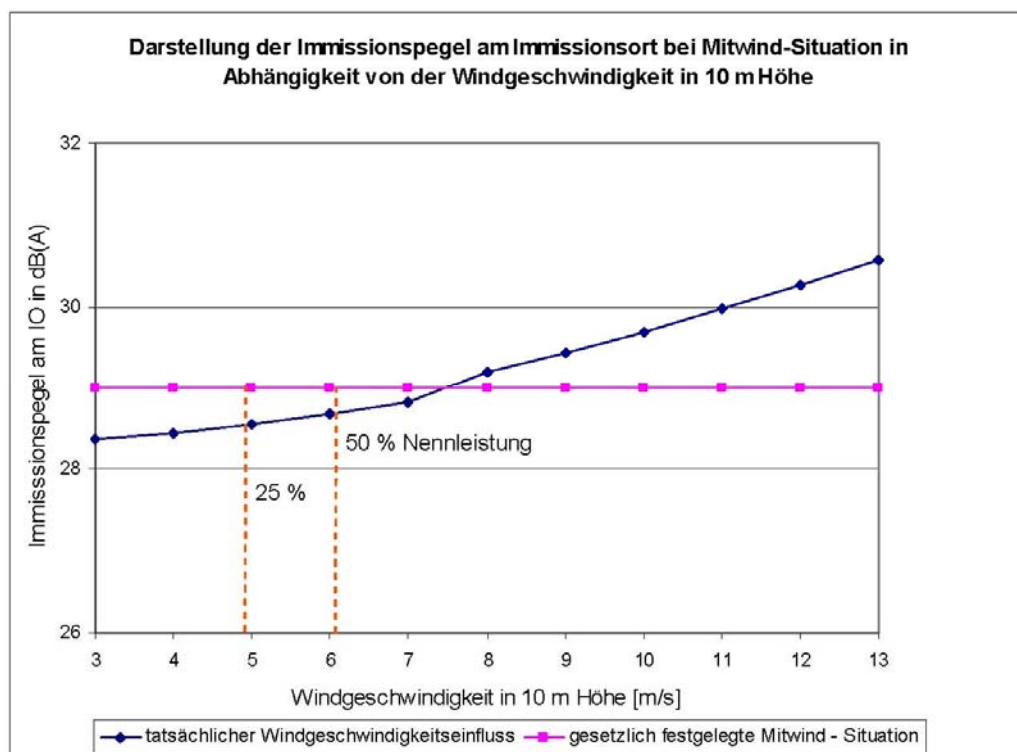


Abbildung 4.3.2.2.2 - 2: Darstellung der Immissionspegel am Immissionsort bei Mitwind-Situation in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe und bei einem Abstand von 1330 m zum Immissionsort, Zuordnung der Nennleistungen der WEA



Es ergeben sich für die aufgeführten Nennleistungen (zwischen dem Verlauf bei tatsächlichem Wind und gesetzlich festgelegter Mitwind-Situation) folgende Pegeldifferenzen: Bei 25 % der Nennleistung wird ein Wert von 0,46 dB und bei 50 % von 0,34 dB erreicht. Falls die Windenergieanlage z.B. auf 50 % ihrer maximalen Nennleistung reduziert werden sollte, würde das den Immissionspegel um gerade mal 0,34 dB senken. Das heißt, eine so starke Einschränkung des Betriebs würde nur eine geringfügige Minderung des Immissionspegels bedeuten.

#### **4.3.2.2.3 Berücksichtigung der Richtcharakteristik einer Windenergieanlage**

Die Richtcharakteristik beschreibt in Abhängigkeit des Winkels wie stark eine Schallquelle Geräusche abstrahlt. Darüber können wiederum Aussagen getroffen werden, welchen Einfluss dies auf die zu erwartenden Schallimmissionen hat. Zum Beispiel wird in einem Winkelbereich, in dem die Schallquelle mehr abstrahlen kann, ein höherer Immissionspegel am Immissionsort prognostiziert als in einem Winkelbereich mit geringerer Schallabstrahlung.

Die Richtcharakteristik DI wird prinzipiell von der in der TA Lärm in Abschnitt A 2.3.4 verwiesenen DIN ISO 9613, Teil 2 berücksichtigt. In der gesetzlichen Auslegung wird von einer Punktschallquelle ausgegangen, die in alle Richtungen unter Mitwindbedingungen gleich abstrahlt. Außerdem wird die bestimmungsgemäße Betriebsart der Anlage, die zum höchsten Beurteilungspegel führt, betrachtet. Nach der technischen Richtlinie für Windenergieanlagen [20] ist die Bestimmung der Richtcharakteristik nicht zwingend erforderlich. Sie dient lediglich zur Überprüfung, in welchem Winkelbereich die höchste Schallemission zu erwarten ist. Nach der DIN EN 61400 [21] wird bei der Messung der Schalldruckpegel von Windenergieanlagen nur der Winkelbereich von  $0^\circ \pm 45^\circ$  und  $180^\circ$  berücksichtigt. Dadurch wird die Richtwirkung der WEA nicht erfasst. Es wird von einer kugelförmigen Richtcharakteristik ausgegangen.

Da die Berechnung der Richtcharakteristik äußerst kompliziert und umfangreich ist, wird die mittlere Richtcharakteristik einer Windenergieanlage nach Piorr [23] in Abb. 4.3.2.2.3 - 1 dargestellt.



Es gibt einige Einflussfaktoren, die die Richtwirkung einer Windenergieanlage unterschiedlich stark beeinflussen können. In der Tab. 4.3.2.2.3 - 1 sind solche Faktoren aufgeführt.

Tabelle 4.3.2.2.3 - 1: Einflussfaktoren auf die Richtwirkung der Windenergieanlage, aus [28], [31]

Faktoren	Einfluss auf die Richtwirkung
Windgeschwindigkeit/ Anströmungsgeschwindigkeit (Zustromseite)	Je höher die Windgeschwindigkeit, desto mehr kommt es zu Wechselwirkungen zwischen Luftmassen und Blatthinterkanten der Anlage. Es bilden sich Turbulenzen an den Blatkanten und -spitzen aus, die zu einer höheren Schallemission in Richtung 0° führen.
Turbulenzen/ Windböen (Abstromseite)	Auf der windabgewandten Seite (Leeseite) kommt es zu Verwirbelungen der anströmenden Luftmassen durch die rotierenden Flügel. Das trägt zu einer Erhöhung der Richtwirkung bei, d.h. die Schallemission wird auf der Leeseite größer.
Windrichtung	Durch die Windrichtungsnachführung, hat die Windrichtung nahezu keinen Einfluss auf die Richtwirkung. Das liegt darin begründet, dass die Anlage immer der Windrichtung entgegensteht. Es wird immer der Schallleistungspegel angegeben der zum höchsten Beurteilungspegel führt (bei 0° stets in Mitwindrichtung).
Profilformen der Anlagenblätter	Bei den Profilformen ist der Einfluss davon abhängig wie dick die Blatkanten sind, wie groß der Anstellwinkel ist und ob Beläge oder Beschädigungen an den Anlagenblättern vorliegen. Eine hohe Blattkantendicke führt zu einer Zunahme der Schallemissionen, da mehr Wechselwirkungen zwischen Luftmasse und Anlagenkante sich ausbilden. Je nach Anstellwinkel der Blätter wird dem Wind eine unterschiedliche Angriffsfläche geboten, wo sich Geräusche ausbilden können. Bei Beschädigungen wie z.B. Risse oder Sonstiges können sich wiederum unterschiedliche Widerstände aufbauen, die zu einer Erhöhung der Schallemission auf der Leeseite führen.

#### 4.3.2.2.4 Abnahmemessung an einem ausgewählten Beispiel

Im Allgemeinen wird die Windgeschwindigkeit  $v_{\text{nenn}}$  bei dem 95%-Wert der Nennleistung über eine vom Hersteller vorgegebene Leistungskurve bestimmt. Dabei garantiert der Hersteller einen Schallleistungspegel, der zum höchsten Beurteilungspegel führt.

In der Praxis wird der Schallleistungspegel bei  $v_{\text{nenn}}$  mit der dazugehörigen Leistung gemessen. Dabei stellt sich immer wieder heraus, dass der garantierte Schallleistungspegel aus Sicherheitsgründen fast immer zu hoch angesetzt ist und somit die Schallminderungsmaßnahmen zu hoch ausfallen. Das kann zu einer Einschränkung des Betriebes einer solchen Anlage führen. Das folgende Beispiel soll diese Sachlage verdeutlichen.

*Beispiel: Windpark Thurland (in Sachsen - Anhalt)*

Der Windpark besteht aus verschiedenen Anlagentypen des Herstellers Enercon. Bei der Enercon E-70 E4, die untersucht wurde, handelt es sich um eine Anlage wie sie in Tab. 4.3.2.2.4 - 1 beschrieben ist.

Tabelle 4.3.2.2.4 – 1: Betriebsdaten der Windenergieanlage Enercon E-70 E 4 [24]

Typ	Enercon E-70 E4
Art	horizontal
Nennleistung	2.000 kW
Leistungsregelung	pitch
Nabenhöhe	113,5 m
Einschaltgeschwindigkeit	2,5 m/s
Abschaltgeschwindigkeit	28 - 34 m/s
Rotordurchmesser	71 m
Anzahl der Blätter	3
Anordnung zum Turm	luv
Nenndrehzahl	6 - 20 min <sup>-1</sup>
Rotorblatteinstellwinkel	variabel
Windrichtungsnachführung	aktiv, elektrisch
Generator	synchron
Spannung	440 V

Dabei werden folgende Werte, die in der Tab. 4.3.2.2.4 - 2 dargestellt sind, aus der vorgegebenen Leistungskurve und aus Herstellerangaben ermittelt.

Tabelle 4.3.2.2.4 - 2: Garantierte Werte für die Schallleistungspegel der E-70 E4 bei den jeweiligen Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe und einer Nabenhöhe von 113 m [24]

Windgeschwindigkeit $v_{p,10}$ in m/s	Schallleistungspegel $L_W$ in dB(A)
4	91,4
5	98,2
6	100,4
7	101,4
8	102,8
9,15 (95 % Nennleistung)	103,0

Bei dieser Anlage wird vom Hersteller Enercon ein Schallleistungspegel von 103 dB(A), bei 95 % Nennleistung und einer Windgeschwindigkeit von 9,15 m/s in 10 m Höhe, garantiert. Die 9,15 m/s entsprechen 13,33 m/s in Nabenhöhe nach Gleichung A.23 im Anhang A. Um eine Überschreitung der Immissionsrichtwerte zu verhindern, müsste im vorliegenden Fall aus [24] ein reduzierter Schallleistungspegel von 101 dB(A) angesetzt werden. Das bedeutet, dass die Anlagen in ihrem Betrieb reduziert werden müssten, indem sie teilweise abgeschaltet bzw. in ihrer Drehzahl reduziert werden.

Bei der Abnahmemessung stellte sich heraus, dass bei der angegebenen Windgeschwindigkeit von 9,15 m/s bei 95 % Nennleistung ein Schallleistungspegel von 102 dB(A) gemessen wurde. D.h., es ist eine Pegeldifferenz von 1 dB zu verzeichnen. Diese Pegeldifferenz führt zu einer Verminderung der Schallemissionen und könnte zur Aufhebung des eingeschränkten Betriebes der Windenergieanlage führen.

Es sollte geprüft werden, ob die Abnahmemessung die garantierten Werte zukünftig ersetzen kann. Damit können nicht gerechtfertigte Betriebsreduzierungen der Anlagen vermieden werden.

#### **4.3.2.3 Vergleich des Einflusses der tatsächlichen Winddaten mit den gesetzlich festgelegten Mitwinddaten auf die zu erwartenden Schallimmissionen**

In dem Modell aus Abschnitt 4.3.1 liegt nach der gesetzlich festgelegten Mitwind-Situation der eingeschränkten [13] eine Zusatzbelastung von 29 dB(A) vor. Bei einer zulässigen Zusatzbelastung von 28 dB(A) führt dies an den Orten bei 0°, 90° und 180° zu einer Überschreitung um 1 dB in der Nacht.

Es soll in diesem Kapitel durch die Berücksichtigung der tatsächlichen Parameter aufgezeigt werden, dass die Immissionen am Immissionsort eingehalten werden können. Im Folgenden werden die einzelnen Parameter der gesetzlich festgelegten Mitwind-Situation nochmals gegenübergestellt.

##### *Windrichtung*

Wie bereits im Abschnitt 4.3.2.2 erwähnt, wird nach der DIN ISO 9613, Teil 2 die Windrichtung nicht mit berücksichtigt.

Im Abschnitt 4.3.2.2.1 ist ein Modell dargestellt, welches den Einfluss der Windrichtung am Immissionsort nachbildet. Dabei stellt sich heraus, dass sich bei gleichförmiger Windgeschwindigkeit von 5 m/s in 10 m Höhe eine Pegelminde- rung bei Mitwind-Situation von 0 bis 0,04 dB, bei Querwind-Situation von 0,04 bis 0,22 dB und bei Gegenwind-Situation von 0,22 bis 0,26 dB ggü. der gesetzlich vorgegebenen Mitwind-Situation in Abb. 4.3.2.2.1 - 2 ergibt. Die Pegeldifferenzen könnten sich letztendlich hinter der Kommastelle des Immissionspegels auswirken und würden gegebenenfalls damit auch eine Einhaltung der zulässigen Immissionspegel bewirken. Die Größenordnung, in der die Pegeldifferenzen vorliegen, ist von der Windgeschwindigkeit abhängig und hat damit einen variierenden Einfluss auf die Nachkommastelle des Immissionspegels. Trotz allem würde die alleinige Betrachtung der Windsituationen in dem Fall nicht zur Einhaltung der zulässigen Zusatzbelastung an den kritischen Immissionsorten bei 0°, 90° und 180° führen.

##### *Windgeschwindigkeit*

In Bezug auf die Windgeschwindigkeit wird in der gesetzlichen Auslegung unter Mitwindbedingungen davon ausgegangen, dass ein leichter Mitwind zwischen 3 bis 5 m/s vorliegt. Im Gegensatz dazu liegen in der Praxis höhere Windgeschwindigkeiten vor, die bei der Geräuschemission von Windenergieanlagen von Bedeutung sind.

Bei der Untersuchung des Einflusses der Windgeschwindigkeit im Abschnitt 4.3.2.2.2 konnte gezeigt werden, dass die Werte der tatsächlichen Windgeschwindigkeit bei Mitwind aufgrund der Dämpfungen ggü. der gesetzlich festgelegten Mitwind-Situation um größer 0 bis 0,64 dB zwischen 3 und 7,66 m/s abweichen. Die Dämpfungen führen unterhalb der Windgeschwindigkeit von 7,66 m/s (bei 95 % Nennleistung) in 10 m Höhe zu einer Minderung des Immissionspegels. Zudem ergaben sich Pegeldifferenzen von 0,01 bis 1,58 dB in einem Geschwindigkeitsbereich von 7,66 m/s und 13 m/s, die zu einer Erhöhung des Immissionspegels führen.

Des Weiteren wird eine Dämpfung von 0,63 dB bei 3 m/s und eine Dämpfung von über 0,5 dB bei kleiner 5 m/s erreicht ggü. dem Immissionspegel von 29 dB(A). In diesem Windgeschwindigkeitsbereich führen die Dämpfungen zu einer Minderung des Immissionspegels und würden eine Einhaltung der Zusatzbelastung von 28 dB(A) (nach Rundung) bewirken.

#### *Richtcharakteristik*

Die gesetzliche Auslegung unter Mitwindbedingungen geht bei der Richtcharakteristik von einer Punktschallquelle mit kugelförmiger Richtcharakteristik aus.

Im Abschnitt 4.3.2.2.3 wird das Modell einer mittleren Richtcharakteristik einer WEA gezeigt. Dazu werden die Faktoren, die auf die Richtcharakteristik Einfluss haben können, aufgeführt. Es kann nur vermutet werden, welchen Einfluss diese haben und wie sich die Richtcharakteristik aufgrund dessen verändern würde. In dem Modell in der Abb. 4.3.2.2.3 - 1 ist ersichtlich, dass es zu einer Minderung der Schallemissionen bei 180° von 0 dB und zwischen 180° und 0° von 0 bis -3 dB kommt. Bei 0° wird eine Erhöhung der Schallemission von +1 bis ca. +2 dB erreicht.

Dementsprechend hat die Richtcharakteristik einen großen Einfluss auf die zu erwartenden Immissionen am Immissionsort. Im Fall der Berücksichtigung der Richtcharakteristik würde es an den Immissionsorten 180° und 90° zur Schallquelle zu einer Einhaltung der zulässigen Immissionspegel kommen. Bei 0° würde die Berücksichtigung der Richtcharakteristik weiterhin nicht zur Einhaltung führen, da die Werte im positiven Bereich liegen und daher zur Erhöhung des Immissionspegels beitragen.

#### 4.4 Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse

In diesem Kapitel wurden die Möglichkeiten zur Leistungssteigerung von Windenergieanlagen durch Reduzierung des eingeschränkten Betriebs aufgezeigt. Dabei wurde der Immissionspegel nach der gesetzlich festgelegten Mitwind-Situation den Werten bei Berücksichtigung der tatsächlichen Windrichtung und -geschwindigkeit als auch der Richtcharakteristik gegenübergestellt. Bei der Berechnung der Schallausbreitung wurden tatsächliche Winddaten verwendet, dabei traten Dämpfungswerte auf, die den Immissionspegel mindern bzw. erhöhen. Aus dem Vergleich der erhaltenen Immissionspegel bei tatsächlichem Wind mit dem nach der gesetzlich festgelegten Mitwind-Situation resultieren Pegeldifferenzen, die eine Leistungssteigerung der betriebseingeschränkten WEA bewirken könnten. Die Größe der Pegeldifferenzen lässt auf die mögliche Größenordnung der Leistungssteigerung von Windenergieanlagen schließen. In der Abb. 4.4 - 1 sind nochmals die sich ergebenden Pegeldifferenzen ggü. der normgerechten Berechnung (bei 0 dB) dargestellt

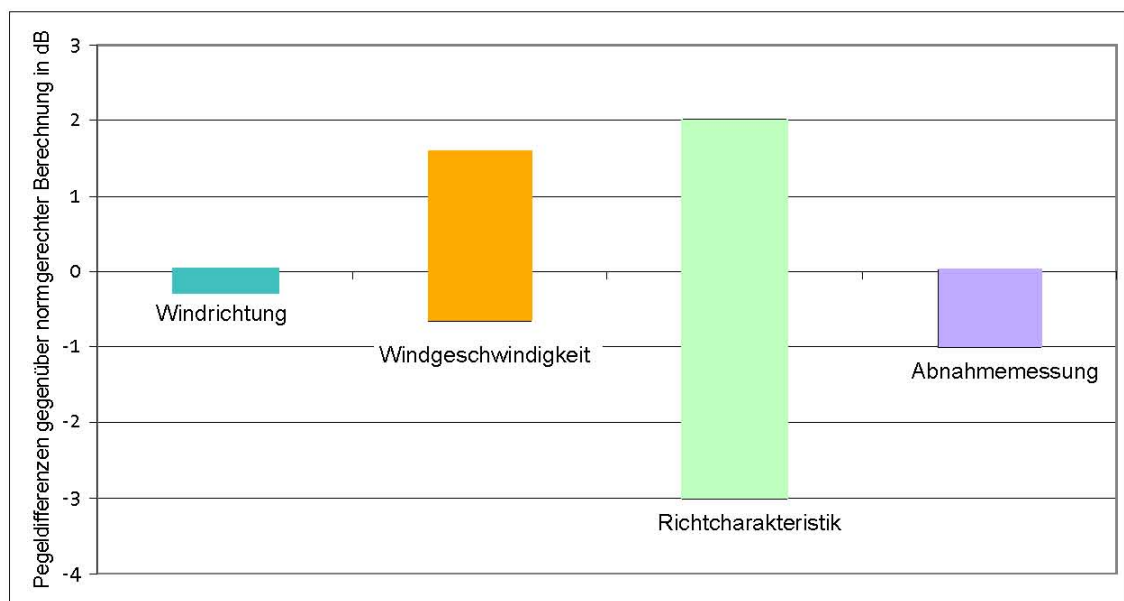


Abbildung 4.4 - 1: Darstellung der sich ergebenden Pegeldifferenzen gegenüber der normgerechten Berechnung

Die Pegeldifferenzen in Abb. 4.4 - 1 haben bei der Berücksichtigung der Windrichtung einen Einfluss auf die Nachkommastelle des Immissionspegels und könnten bei der Rundung des Immissionspegels zu einer Einhaltung der Immissionspegel am Immissionsort führen. Zusätzlich auftretende Effekte, die in dieser Arbeit nicht mit betrachtet wurden, müssen zukünftig noch untersucht werden.



Bei der Untersuchung der Windgeschwindigkeit ergeben sich Pegeldifferenzen (vgl. Abbildung 4.4 - 1), die bei niedrigen Windgeschwindigkeiten eine Minderung bzw. bei höheren Windgeschwindigkeiten eine Erhöhung des Immissionspegels verursachen. Bei niedrigen Windgeschwindigkeiten könnten die Pegeldifferenzen zu einer Einhaltung des zulässigen Immissionspegels führen.

Bei Betrachtung der Richtcharakteristik einer Windenergieanlage traten Pegeldifferenzen auf, die in Abhängigkeit des Winkels, in der die Windenergieanlage abstrahlt, eine Minderung bzw. eine Erhöhung des Immissionspegels am Immissionsort bewirken. Im Rotorebenenbereich könnten die Pegeldifferenzen zu einer Einhaltung des Immissionspegels am Immissionsort führen.

Die Möglichkeit durch eine Abnahmemessung die Leistung der Windenergieanlage zu steigern, ist gerechtfertigt. In der Arbeit konnte gezeigt werden, dass der Schalleistungspegel bei der Abnahmemessung geringer ist als der vom Hersteller garantierte Schalleistungspegel. Durch den Ersatz des garantierten Wertes durch den gemessenen Wert könnte eine teilweise Reduzierung des eingeschränkten Betriebes der Anlage erreicht werden. Der Austausch der Werte ist aber nach Immissionsschutzrecht nicht zulässig.

## **5 Schallemissionskontingentierung**

### **5.1 Allgemeine Einführung**

Im Rahmen der städtebaulichen Planung soll gewährleistet werden, dass die Geräuscheinwirkungen durch die zulässigen Nutzungen in Gewerbe- und Industriegebieten nicht zu unzulässigen Schallimmissionen führen. Deshalb ist in der Planung ein Konzept für die Verteilung der Geräuschanteile zu entwickeln. Es soll dabei berücksichtigt werden, dass z.B. nicht nur eine Gewerbeanlage die gesetzlichen Vorgaben mit ihrem emittierten Lärm ausschöpft, sondern die Geräuschanteile sollen auf alle Flächen "gerecht" verteilt werden. Ein Instrument, mit dem ein solches Konzept in der städtebaulichen Planung rechtlich umgesetzt werden kann, ist die Festsetzung von Geräuschkontingenten im Bebauungsplan.

Die Geräuschkontingentierung wird in Schallimmissionskontingentierung und Schallemissionskontingentierung unterteilt. In Bezug auf die Schallimmissionen legt die Schallimmissionskontingentierung die Immissionskontingente fest, die nicht überschritten werden dürfen. Die Schallemissionskontingentierung bezieht sich auf die Schallemissionen, die von den einzelnen Teilflächen ausgehen. Die Emissionskontingente werden im Bebauungsplan festgesetzt und sind einzuhalten, um eine Einhaltung der zulässigen Immissionsrichtwerte garantieren zu können.

Im Folgenden werden die gesetzlichen und normativen Grundlagen einer Schallemissionskontingentierung, wie sie für Gewerbegebiete gelten, dargestellt und auf einen Windpark übertragen. Des Weiteren wird die Aufteilung der Leistungsreduzierungen auf verschiedene Betreiber innerhalb eines Windparks mittels einer Emissionskontingentierung unter Mitwindbedingungen untersucht und die Möglichkeit zur Leistungssteigerung der Windenergieanlagen aufgezeigt.

### **5.2 Gesetzliche und normative Vorgaben**

Im Rahmen von Genehmigungsverfahren und der Aufstellung von Bebauungsplänen sind die Geräuscheinwirkungen zu ermitteln und auf der Basis gesetzlicher Vorgaben wie der TA Lärm [9] bzw. der DIN 18005 [26] zu beurteilen. Eine Beurteilung nach TA Lärm wird bei Genehmigungen z.B. von Windenergieanlagen und nach DIN 18005 bei einer städtebaulichen Planung durchgeführt.

In der Tab. 5.2 - 1 sind die Gebietseinstufungen mit den dazugehörigen Immissionsrichtwerten (IRW) nach TA Lärm und den Orientierungswerten nach DIN 18005 Bbl. 1 [25] dargestellt.

Tabelle 5.2 - 1: Gebietseinstufungen mit dazugehörigen Immissionsrichtwerten (IRW) nach TA Lärm [9] und Orientierungswerten nach DIN 18005 Bbl. 1 [25], [26]

Gebietseinstufung nach baulicher Nutzung	IRW in dB(A) nach TA Lärm		Orientierungswerte in dB(A) nach DIN 18005	
	tags	nachts	tags	nachts
Industriegebiet	70	70	-	-
Gewerbegebiet	65	50	65	50
Kern-, Dorf- und Mischgebiet	60	45	60	45
Allgemeines Wohngebiet	55	40	55	40
Reines Wohngebiet	50	35	50	35
Kurgebiete, Krankenhäuser, Pflegeanstalten	45	35	45	35
Besondere Wohngebiete	-	-	60	40
Friedhöfe, Kleingartenanlagen, Parkanlagen	-	-	55	55

Bei Genehmigungsverfahren werden zum Nachweis der Einhaltung der Schutzansprüche für schutzbedürftige Nutzungen die Geräuschemissionen der erarbeiteten Planungskonzepte der Anlagen messtechnisch und rechnerisch ermittelt und gegebenenfalls optimiert. In den Bebauungsplänen ist bei der Kontingentierung die schalltechnische Verträglichkeit zwischen geplanten oder bereits vorhandenen Gewerbebetrieben und Wohngebieten sicherzustellen.

Zur Sicherstellung des Schallimmissionsschutzes bei geplanten Gewerbegebieten kann als Werkzeug die Geräuschkontingentierung gemäß DIN 45691 [27] eingesetzt werden. Die Norm dient zur Regelung der Intensität der Flächennutzung durch die Festsetzung von Emissionskontingenten unter Mitwindbedingungen, d.h. die insgesamt zulässigen Geräuschabstrahlungen werden auf einzelne Teilflächen des Gewerbegebietes verteilt, die in alle Richtungen gleich abstrahlen.

In dem folgenden Abschnitt 5.3 werden die Berechnungsschritte einer Emissionskontingentierung aufgeführt, um zu verdeutlichen, wie eine solche Kontingentierung abläuft und was zu beachten ist.

### 5.3 Berechnungsschritte einer Emissionskontingentierung

In diesem Abschnitt werden die Schritte zur Berechnung der Emissionskontingente nach DIN 45691 [27] aufgezeigt. Die einzelnen Schritte sollen in einem Beispielmmodell verdeutlicht werden.

Zuerst werden die Gesamt-Immissionswerte  $L_{GI,j}$ <sup>11</sup> in dB(A) für die schutzbedürftigen Gebiete in der Umgebung des Plangebietes festgelegt. Die Gesamt-Immissionswerte  $L_{GI,j}$  für die Immissionsorte j sind auf ganze dB(A) festzulegen. Die Werte dürfen i. d. R. nicht höher sein als die Immissionsrichtwerte der TA Lärm.

Wenn bereits eine bestehende Vorbelastung  $L_{vor,j}$  vorliegt, sind die Planwerte  $L_{PL,j}$  in dB(A) für die einzelnen Immissionsorte j nach der Gleichung 5.1 festzulegen.

$$L_{PL,j} = 10 \cdot \lg \left( 10^{0,1 \cdot L_{GI,j}} - 10^{0,1 \cdot L_{vor,j}} \right) \text{ [dB(A)]} \quad (5.1)$$

mit

$L_{vor,j}$  - Immissionspegel in dB(A) durch schon vorhandene Anlagen (Vorbelastung) an den Immissionsorten

$L_{GI,j}$  - Gesamt-Immissionswert in dB(A) an den Immissionsorten.

Falls keine Vorbelastung vorhanden ist, sind die Planwerte gleich den Gesamt-Immissionswerten für die umgebenden Gebiete. Die Werte werden auf ganze dB(A) gerundet.

Um die Geräuschkontingente im Plangebiet festlegen zu können, wird das Plangebiet in Teilflächen i (i = 1, 2, 3...) aufgeteilt. Flächen, bei denen eine gewerbliche Nutzung ausgeschlossen ist, wie z.B. Grünflächen und Verkehrsflächen, werden bei der Kontingentierung ausgeschlossen.

Für die Berechnung bzw. Zuordnung der Emissionskontingente dieser Teilflächen werden ausreichend viele Immissionsorte außerhalb des Plangebietes so festgelegt, dass alle Planwerte  $L_{PL,j}$  an den Immissionsorten sicher eingehalten werden.

---

<sup>11</sup> Das Indize j nimmt Bezug auf die Schallimmissionen und steht für die Immissionsorte j mit j = 1, 2, 3,.. (z. B. der Gesamt-Immissionswert ist für den Immissionsort 1 festzulegen).

$$L_{Pl,j} \leq 10 \cdot \lg \sum_i 10^{0,1 \cdot (L_{IK,i,j})} \text{ [dB(A)]} \quad (5.2)$$

mit

$L_{Pl,j}$  - Planwerte in dB(A) für die Immissionsorte j und

$L_{IK,i,j}$ <sup>12</sup> - Immissionskontingente in dB(A) an den Immissionsorten j verursacht durch die schallemittierenden Teilflächen.

Dabei ist  $L_{IK,i,j}$ :

$$L_{IK,i,j} = L_{EK,i} - \Delta L_{i,j} \text{ [dB(A)]} \quad (5.3)$$

mit

$L_{IK,i,j}$  - Immissionskontingente in dB(A) an den Immissionsorten, verursacht durch die schallemittierenden Teilflächen,

$\Delta L_{i,j}$  - Pegelminderung zwischen Emissionsfläche und Immissionsort unter rein geometrischen Ausbreitungsbedingungen und

$L_{EK,i}$  - Emissionskontingente in dB(A) der Teilflächen

und

$$\Delta L_{i,j} = -10 \cdot \lg \left( \frac{S_i}{4 \cdot \pi \cdot s_{i,j}^2} \right) \text{ [dB(A)]} \quad (5.4)$$

mit

$S_i$  - Teilfläche des Plangebiets in m<sup>2</sup> und

$s_{i,j}$  - Abstand des Immissionsortes vom Flächenmittelpunkt der schallemittierenden Teilfläche in m.

---

<sup>12</sup> Das Indize i steht für die einzelnen Teilflächen von denen eine Schallemission ausgeht.

Die Emissionskontingente  $L_{EK,i}$  der Teilflächen berechnen sich wie folgt:

$$L_{EK,i} = L_W - 10 \cdot \lg\left(\frac{S_i}{m^2}\right) \quad [\text{dB(A)}] \quad (5.5)$$

mit

$L_W$  - Schalleistungspegel der Anlage in dB(A) auf der Teilfläche und

$S_i$  - Teilfläche des Plangebiets in  $m^2$ .

Wenn die Ergebnisse zu einer Überschreitung der vorgesehen Planwerte führen, müssen die Emissionskontingente  $L_{EK,i}$  vermindert werden. Dabei werden die Emissionskontingente  $L_{EK,i}$  der einzelnen Teilflächen so verändert, dass eine optimale Anpassung an die Planwerte an den Immissionsorten erreicht wird. Die Festlegung der Emissionskontingente  $L_{EK,i}$  für die Teilflächen werden auch für die anderen Immissionsorte durchgeführt.

Neben der Einhaltung des Planwerts am kritischen Immissionsort kann es bei anderen Immissionsorten zu einer Unterschreitung der Planwerte kommen. Die DIN 45691 lässt hierfür ein zusätzliches Emissionskontingent zu, das richtungs- oder immissionsortabhängig ist.

Die Vorgehensweise dieser Emissionskontingentierung kann an dem nachfolgenden Beispielmmodell nachvollzogen werden.

### Beispielmodell

In der Abb. 5.3 - 1 wird ein vereinfachtes Modell eines Gewerbegebietes dargestellt. In der Umgebung des Gewerbegebietes werden die Immissionsorte (1. IO und 2. IO) nach der TA Lärm [9] als Allgemeines Wohngebiet eingestuft. Für die Untersuchung der Immissionsorte wird ein Gesamt-Immissionswert  $L_{GI}$  für den kritischsten Nachtfall von 40 dB(A) nach [9] festgelegt. Die Werte für den Tag werden meist eingehalten und werden deshalb nicht mit betrachtet.

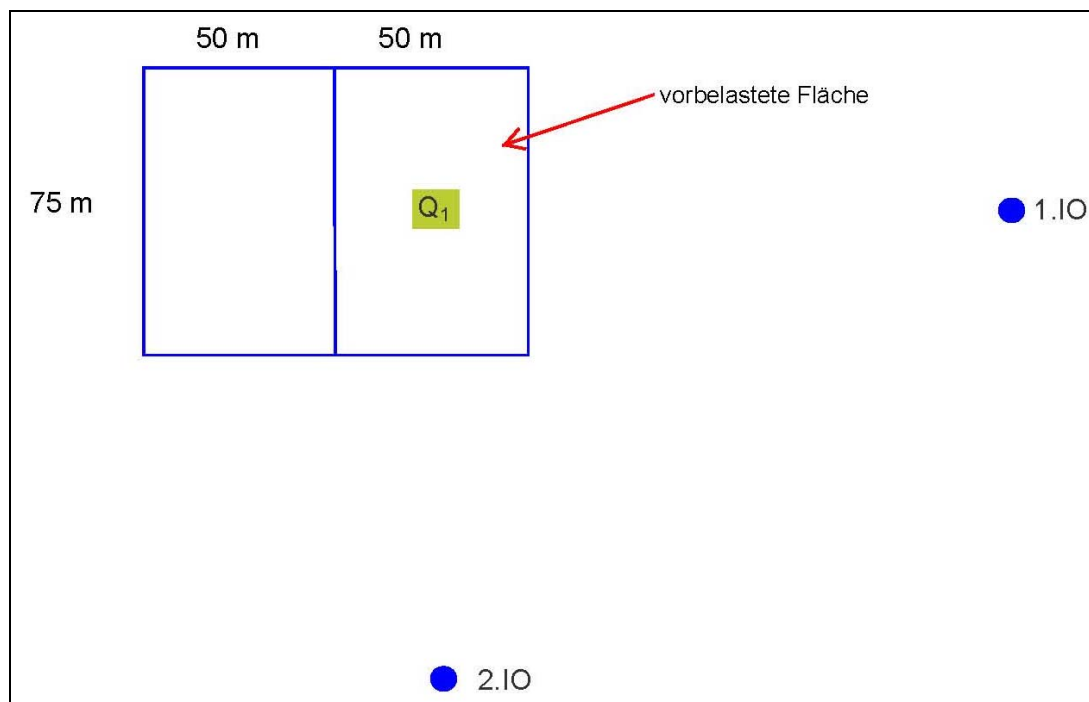


Abbildung 5.3 - 1: Darstellung eines vereinfachten Modells eines Gewerbegebietes mit einer bereits vorhandenen Vorbelastung durch eine Anlage (Q<sub>1</sub>); Festlegung der Immissionsorte (1. IO und 2. IO); (Abbildung ist nicht maßstäblich)

In dem Modell in Abb. 5.3 - 1 ist eine Vorbelastung durch eine bereits vorhandene Anlage (Q<sub>1</sub>) gegeben. Die vorbelastete Fläche umfasst 3.750 m<sup>2</sup>. Der Flächenmittelpunkt der vorbelasteten Fläche liegt vom ersten Immissionsort (1. IO) 200 m und vom zweiten Immissionsort (2. IO) 150 m entfernt. Es ist ein Schallleistungspegel  $L_W$  von 90 dB(A) und ein immissionswirksamer flächenbezogener Schallleistungspegel  $L_{W''}$  von 54 dB(A) nach Gleichung 5.5 gegeben, wobei der immissionswirksame flächenbezogene Schallleistungspegel  $L_{W''}$  dem Emissionskontingent  $L_{EK}$  entspricht.

Um die Vorbelastung an den Immissionsorten bestimmen zu können, werden nach Gleichung 5.3 die Immissionskontingente  $L_{IK}$  berechnet. Die Immissionskontingente  $L_{IK}$  an den einzelnen Immissionsorten werden aus dem Emissionskontingent  $L_{EK}$  der vorbelasteten Fläche nach Gleichung 5.5 und aus der Differenz  $\Delta L$  (Pegelminderung), die sich zwischen Emissionsfläche und Immissionsort durch rein geometrische Ausbreitungsbedingungen ergibt, nach Gleichung 5.4 ermittelt.

Es ergibt sich ein Immissionskontingent  $L_{IK}$  am ersten Immissionsort von 33 dB(A) und am zweiten Immissionsort von 35 dB(A). Daraus resultiert wiederum ein Planwert von 39 dB(A) am ersten Immissionsort und von 38 dB(A) am zweiten Immissionsort nach Gleichung 5.2.

In dem Beispielmmodell in Abb. 5.3 - 2 wird das Plangebiet in 2 Teilflächen (TF 1 und TF 2) geteilt. Die zwei Teilflächen haben eine Fläche von jeweils 3750 m<sup>2</sup>. Auf der zweiten Teilfläche wird eine weitere Bebauung ( $Q_2$ ) geplant.

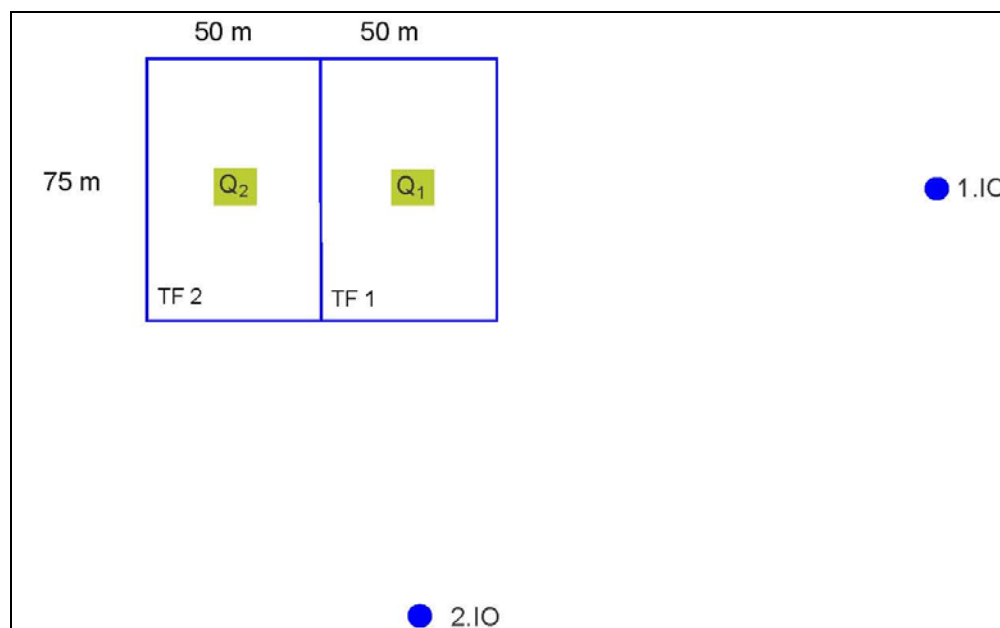


Abbildung 5.3 - 2: Unterteilung des Plangebietes in 2 Teilflächen (TF1 und TF 2), Festlegung einer weiteren geplanten Bebauung ( $Q_2$ ) auf der zweiten Teilfläche; (Abbildung ist nicht maßstäblich)

Der Flächenmittelpunkt der zweiten Teilfläche ist vom ersten Immissionsort 250 m und vom zweiten Immissionsort 158,1 m entfernt. Es ist ein Schallleistungspegel  $L_W$  von 95 dB(A) und ein Emissionskontingent  $L_{EK}$  von 59 dB(A) gegeben. Weiterhin ist für die erste Teilfläche das Emissionskontingent  $L_{EK}$  von 54 dB(A) vorgegeben.



Aus den gegebenen Abständen zwischen den einzelnen Flächenmittelpunkten und Immissionsorten, den vorgegebenen Emissionskontingenten  $L_{EK}$  der einzelnen Teilflächen und der Größe der einzelnen Teilflächen können die Immissionskontingente  $L_{IK}$  an den Immissionsorten nach den Gleichungen 5.3 bis 5.5 berechnet werden. Die sich ergebenden Immissionskontingente  $L_{IK}$  an den einzelnen Immissionsorten sind in der Tabelle 5.3 - 1 dargestellt.

Tabelle 5.3 - 1: Vergleich der berechneten Immissionskontingente mit den festgelegten Planwerten am ersten und zweiten Immissionsort

	$L_{IK}$ in dB(A) am	
	1. IO	2. IO
1. Teilfläche	33,0	35,5
2. Teilfläche	36,0	40,0
$L_{IK,ins.}$ in dB(A)	37,8	<b>41,3</b>
Planwert in dB(A)	39,0	<b>38,0</b>
Überschreitung in dB	-	3,3

In der Tab. 5.3 - 1 wird ersichtlich, dass das Immissionskontingent  $L_{IK}$  den vorgegebenen Planwert am zweiten Immissionsort überschreitet. Deshalb wird das Emissionskontingent  $L_{EK}$  der zweiten Teilfläche reduziert, um eine optimale Anpassung an den Planwert am Immissionsort zu erreichen. Daraus ergeben sich neue Immissionskontingente an den einzelnen Immissionsorten (vgl. Tabelle 5.3 - 2).

Tabelle 5.3 - 2: Darstellung der neuen Immissionskontingente gegenüber den Planwerten an den einzelnen Immissionsorten (IO) und Festlegung des Zusatzkontingents

	$L_{IK}$ in dB(A) am	
	1. IO	2. IO
1. Teilfläche	33,0	35,5
2. Teilfläche	31,0	35,0
$L_{IK,ins.}$ in dB(A)	35,1	38,3
Planwert in dB(A)	39,0	38,0
Unterschreitung in dB	3,9	-
$L_{EK, zus,k}$ in dB(A)	3	-

An dem ersten Immissionsort in Tab. 5.3 - 2 kommt es zu einer Unterschreitung des Planwerts. Entsprechend können nach der DIN 45691 zusätzliche Emissionskontingente vergeben werden.

## 5.4 Praktischer Nachweis einer Emissionskontingentierung an einem Windpark mit mehreren Betreibern

### 5.4.1 Allgemeine Modellbeschreibung

Der geplante Windpark, an dem die Verteilung der Leistungsreduzierungen auf mehrere Betreiber untersucht wird, soll aus 9 Windenergieanlagen A 1 bis A 9 bestehen. Die Geräuschquellen der einzelnen Windenergieanlagen bilden dabei zusammen einzelne Flächenquellen aus. Die Angaben zu den Windenergieanlagen und den Immissionsorten (IO) entsprechen den Werten des Modells im Abschnitt 4.3.1. Der Wind weht in Richtung des dritten Immissionsortes (3. IO). Des Weiteren sind die Anlagen in der Abb. 5.4.1 - 1 zur Hauptwindrichtung 460 m voneinander entfernt und in Hauptwindrichtung 912 m entfernt. Die Abstände ergeben sich aus den Mindestabständen aus dem Abschnitt 3.2.1. In diesem Fall wurde zur Windrichtung der 4 -fache Rotordurchmesser und in Windrichtung der 8 -fache Rotordurchmesser verwendet. In Windrichtung werden größere Abstände festgelegt. Dadurch nehmen sich die Windenergieanlagen nicht gegenseitig den Wind weg und beeinflussen sich nicht gegenseitig. Die Immissionsorte sind mit 1., 2., 3. und 4. IO gekennzeichnet und liegen 1330 m zur nächstgelegenen Schallquelle entfernt. Das Plangebiet umfasst eine Fläche von ca. 6.822.480 m<sup>2</sup>.

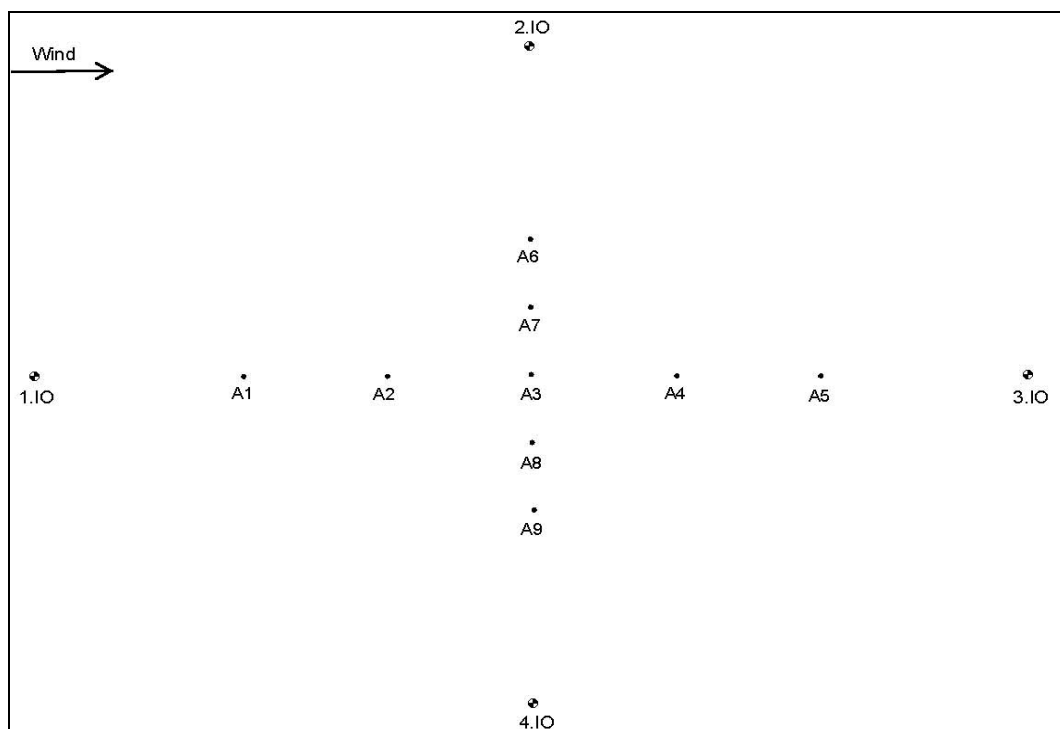


Abbildung 5.4.1 - 1: Vereinfachtes Modell eines Windparks mit 9 Windenergieanlagen (A 1 bis A 9) und Festlegung der zu untersuchenden Immissionsorte (1. bis 4. IO), (Maßstab: 1 cm  $\triangleq$  506,7 m)

### 5.4.2 Praktische Durchführung einer Emissionskontingentierung

Für die Durchführung der Emissionskontingentierung an einem Windpark, wird das Modell aus Abschnitt 5.4.1 verwendet.

Die Immissionsorte werden wie folgt eingestuft: erster, dritter und vierter Immissionsort (IO) gelten als Allgemeines Wohngebiet und zweiter Immissionsort als Reines Wohngebiet. Daraus resultieren Gesamt-Immissionswerte  $L_{GI}$  für die einzelnen Immissionsorte, die hier den Immissionsrichtwerten der TA Lärm entsprechen (vgl. Tabelle 5.4.2 - 1).

Tabelle 5.4.2 - 1: Festlegung der Gesamt-Immissionswerte an den Immissionsorten

Immissionsort (IO)	$L_{GI}$ tags in dB(A)	$L_{GI}$ nachts in dB(A)
1	55	40
2	50	35
3	55	40
4	55	40

Es wird angenommen, dass der Windpark aus neun Betreibern besteht, auf die die Emissionskontingente  $L_{EK}$  aufgeteilt werden sollen. Aus diesem Grund wird das Plangebiet in mehrere Teilflächen wie in Abb. 5.4.2 - 1 dargestellt, aufgeteilt.

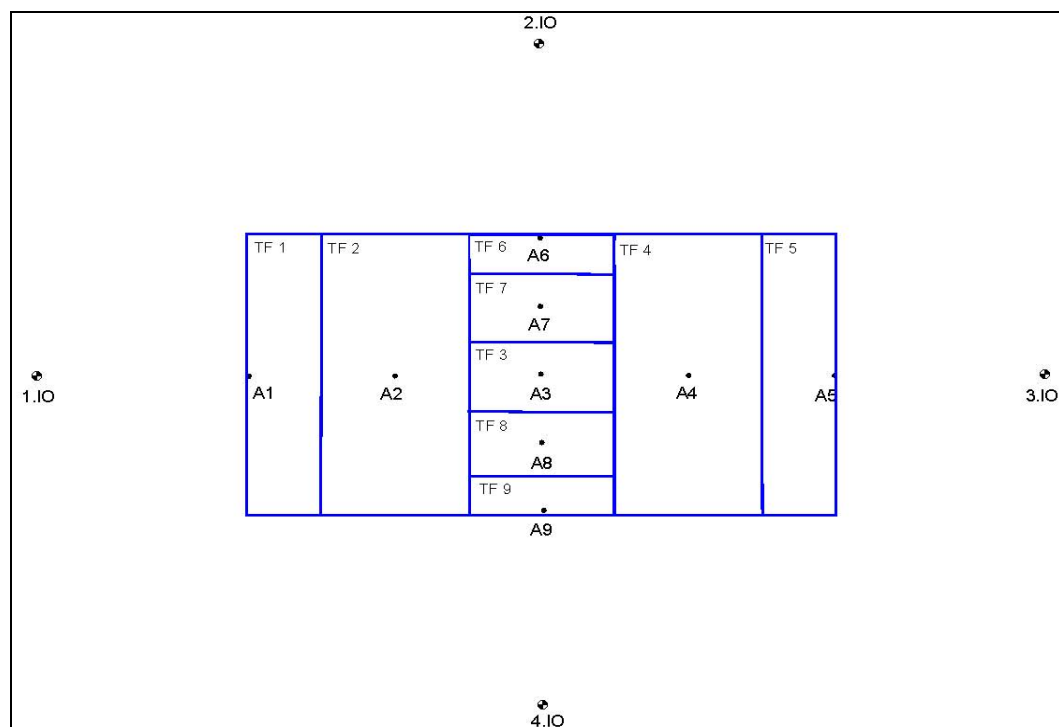


Abbildung 5.4.2 - 1: Festlegung der Teilflächen (TF 1 bis TF 9) innerhalb des Windparks, (Maßstab: 1 cm  $\triangleq$  460 m)

Bei dem geplanten Windpark liegt keine Vorbelastung vor. Damit sind die Planwerte  $L_{PI}$  nach Gleichung 5.1 gleich den Gesamt-Immissionswerten  $L_{GI}$  der einzelnen Immissionsorte.

Die Flächenmittelpunkte der einzelnen Teilflächen sind zu den Immissionsorten in einen Abstand, wie er in der Tab. B - 5 im Anhang B aufgeführt ist, entfernt. Unter Berücksichtigung der Abstände und der Flächengröße der einzelnen Teilflächen können nach Gleichung 5.4 die Differenzen  $\Delta L$ , die sich zwischen Emissionsfläche und Immissionsort durch rein geometrische Ausbreitungsbedingungen ergeben, berechnet werden. In der Tab. B - 5 im Anhang B sind die Differenzen  $\Delta L$  dargestellt.

Die Windenergieanlagen haben einen Schalleistungspegel von 106 dB(A). Aus den Schalleistungspegeln der Windenergieanlagen und den Flächengrößen der einzelnen Teilflächen können die Emissionskontingente  $L_{EK}$  für die einzelnen Teilflächen unter Mitwindbedingungen nach Gleichung 5.5 berechnet werden (vgl. Tabelle B - 5 und B - 6 im Anhang B).

Nachdem die Differenzen  $\Delta L$  und die Emissionskontingente  $L_{EK}$  der einzelnen Teilflächen bestimmt sind, werden die Immissionskontingente  $L_{IK}$  an den einzelnen Immissionsorten für die Mitwind-Situation berechnet (vgl. Tabelle B - 7 im Anhang B). In Tab. 5.4.2 - 2 ist ein Auszug aus der Tab. B - 7 dargestellt, in der die berechneten Immissionskontingente  $L_{IK}$  den Planwerten  $L_{PI}$  der einzelnen Immissionsorte (1. bis 4. IO) gegenüber gestellt sind. Dabei stellt sich heraus, dass es am zweiten Immissionsort zu einer Überschreitung von 2,9 dB kommt.

Tabelle 5.4.2 - 2: Vergleich der berechneten Immissionskontingente mit den festgelegten Planwerten an den einzelnen Immissionsorten (1. bis 4. IO) für die Nacht

	Immissionskontingent $L_{IK}$ in dB(A)			
	1. IO	2. IO	3. IO	4. IO
Planwert in dB(A)	40,0	<b>35,0</b>	40,0	40,0
$L_{IK, ges}$ in dB(A)	36,1	<b>37,9</b>	36,1	37,9
Überschreitung in dB	-	2,9	-	-

Bei Betrachtung der Immissionsanteile (Tab. B - 5 im Anhang B) wird ersichtlich, dass die Teilflächen 1 bis 7 die größten Schallimmissionsanteile am zweiten Immissionsort verursachen. Die Teilflächen 8 und 9 spielen dabei keine Rolle, da sie von dem Immissionsort zu weit entfernt liegen.

Deshalb werden die Emissionskontingente  $L_{EK}$  der einzelnen Teilflächen auf die Werte, wie sie in Tab. B - 7 im Anhang B dargestellt sind, gemindert. Die Teilflächen 8 und 9 behalten ihr Emissionskontingent  $L_{EK}$  bei. Nach der Änderung der Emissionskontingente  $L_{EK}$  können wiederum die Immissionskontingente  $L_{IK}$  für die Mitwind-Situation berechnet werden (vgl. Tabelle B - 7 im Anhang B). In der Tab. 5.4.2 - 3 ist ein Auszug aus der Tab. B - 7 dargestellt, in der die neuen Immissionskontingente nach der Minderung der Emissionskontingente aufgezeigt werden.

Tabelle 5.4.2 - 3: Vergleich der neu berechneten Immissionskontingente mit den Planwerten an den einzelnen Immissionsorten (1. bis 4. IO) für die Nacht

	Immissionskontingent $L_{IK}$ in dB(A)			
	1. IO	2. IO	3. IO	4. IO
Planwert in dB(A) für die Nacht	40,0	<b>35,0</b>	40,0	40,0
$L_{IK, ges}$ in dB(A)	33,4	<b>34,8</b>	33,4	36,2
Unterschreitung in dB	7	-	7	4

Aus der Tab. 5.4.2 - 2 geht hervor, dass der Immissionspegel den vorgegeben Planwert am zweiten Immissionsort einhält. Zudem kommt es an den anderen Immissionsorten, durch die Minderung der Emissionskontingente  $L_{EK}$  der einzelnen Teilflächen, zu einer Unterschreitung der Planwerte. Daraufhin werden Zusatzkontingente nach DIN 45691 vergeben.

### 5.4.3 Beurteilung der Ergebnisse

In dem Modell im Abschnitt 5.4.1 kam es am zweiten Immissionsort zu einer Überschreitung des Immissionsrichtwertes um 2,9 dB in der Nacht. Dabei lag der Immissionspegel am ersten und dritten Immissionsort bei 38 dB(A) und am zweiten und vierten Immissionsort bei 39 dB(A). Daraufhin wurde eine Schallemissionskontingentierung unter Mitwindbedingungen durchgeführt, die einen Immissionspegel von 34 dB(A) am ersten und dritten Immissionsort, von 35 dB(A) am zweiten Immissionsort und von 37 dB(A) am vierten Immissionsort erreicht hat. Die erhaltenen Werte unter Mitwindbedingungen führen bei allen Immissionsorten zu einer Einhaltung der Immissionsrichtwerte in der Nacht. Dabei wurden die reduzierten Emissionskontingente in Tab. B - 7 auf die Betreiber so verteilt, dass eine optimale Auslastung der Flächennutzung gegeben ist.

Die ermittelten Emissionskontingente gelten für die Mitwind-Situation.

In der Praxis stellt die Mitwind-Situation eine von drei Windsituationen dar, die im Jahr auftreten. Die Windenergieanlagen können in einer Windrichtung ausgerichtet sein, bei der keine Mitwind-Situation am Immissionsort verursacht wird. Stattdessen tritt die Gegenwind- oder Querwind-Situation auf. Die Gegenwind- und Querwind-Situation verursachen geringere Schallimmissionen am Immissionsort ggü. der Mitwind-Situation. In diesen Fällen könnte eine Leistungssteigerung der Windenergieanlagen durch die Erhöhung der Emissionskontingente erreicht werden. Die Betreiber der Windenergieanlagen müssten die Windenergieanlagen so einstellen, dass sie bei den Windrichtungen, bei denen die Mitwind-Situation am Immissionsort verursacht wird, in ihrem Betrieb reduziert werden und bei den anderen Windrichtungen nicht.

## **5.5 Zusammenfassung der gewonnen Erkenntnisse**

In Kapitel 5 wurden die normativen und gesetzlichen Vorgaben zur Schallemissionskontingentierung, wie sie für Gewerbegebiete gelten, aufgeführt. An einem vereinfachten Beispielmmodell eines Gewerbegebietes wurde die Durchführung einer solchen Kontingentierung dargestellt. Zudem wurde die Verteilung der Leistungsreduzierungen auf mehrere Betreiber innerhalb eines Windparks mittels einer Emissionskontingentierung aufgezeigt. Dabei konnte eine optimale Auslastung der Flächennutzung und die Einhaltung der Planwerte an den Immissionsorten erreicht werden.

In Abhängigkeit der Windrichtung, in der die Windenergieanlagen ausgerichtet sind, treten mehrere Windsituationen (Mitwind, Querwind und Gegenwind) am Immissionsort auf. Bei der Gegenwind- und Querwind-Situation werden geringere Schallimmissionen am Immissionsort gegenüber der Mitwind-Situation verursacht. In diesen Fällen könnte eine Leistungssteigerung der Windenergieanlagen durch die Erhöhung der Emissionskontingente erreicht werden. Die Betreiber der Windenergieanlagen müssten die Windenergieanlagen so einstellen, dass sie nur bei den Windrichtungen, bei denen die Mitwind-Situation am Immissionsort verursacht wird, in ihrem Betrieb reduziert werden.

Des Weiteren könnten sich die Betreiber gegenseitig Flächenanteile verkaufen, um ihr Emissionskontingent ihrer Teilfläche zu vergrößern und damit die Leistung der Windenergieanlage zu erhöhen.

## 6 Zusammenfassung

Einleitend wurden die technischen, gesetzlichen und immissionsrelevanten Grundlagen von Windenergieanlagen beschrieben. Diese Grundlagen berücksichtigend, wurden in der Arbeit Möglichkeiten zur Leistungssteigerung durch eine Reduzierung des eingeschränkten Betriebs einer Windenergieanlage mittels einer detaillierten Schallausbreitungsrechnung aufgezeigt. Der Einfluss der tatsächlichen Windrichtung und -geschwindigkeit auf die zu erwartenden Schallimmissionen am Immissionsort sind dabei untersucht worden.

Bei einem Vergleich der Werte bei tatsächlichem Wind mit dem Wert nach gesetzlicher Auslegung unter Mitwindbedingungen konnte gezeigt werden, dass sich die ermittelten Pegeldifferenzen nur auf die Nachkommastelle des Immissionspegels auswirken. Dabei könnte durch Rundung des Immissionspegels eine Einhaltung des Immissionspegels am Immissionsort erreicht werden. Zusätzlich auftretende Effekte, die in dieser Arbeit nicht mit betrachtet wurden, müssen zukünftig noch untersucht werden.

Bei Berücksichtigung der Windgeschwindigkeit wurden Pegeldifferenzen erreicht, die zu einer Minderung bzw. einer Erhöhung des Immissionspegels am Immissionsort führen. Bei niedrigen Windgeschwindigkeiten könnte eine Einhaltung des zulässigen Immissionspegels am Immissionsort erreicht werden.

Zudem wurde die Richtcharakteristik der Schallabstrahlung mit berücksichtigt. Die in Abhängigkeit des Winkels, in der die Windenergieanlage abstrahlt, eine Minderung bzw. eine Erhöhung des Immissionspegels am Immissionsort bewirken kann. Im Rotorebenenbereich könnten die Pegeldifferenzen zu einer Einhaltung des zulässigen Immissionspegels am Immissionsort führen.

Zusätzlich zu den aufgeführten Möglichkeiten könnte eine Abnahmemessung zur Leistungssteigerung einer Windenergieanlage beitragen. Bei einer Abnahmemessung stellt sich i. d. R. heraus, dass der gemessene Schallleistungspegel geringer ist als der vom Hersteller garantierte Schallleistungspegel. Wenn der garantierte Wert durch den gemessenen Wert ersetzt werden würde, könnte eine teilweise Reduzierung des eingeschränkten Betriebes der Windenergieanlage erreicht werden. Der Austausch der Werte ist nach Immissionsschutzrecht nicht zulässig.

Des Weiteren wurden in der Arbeit gesetzliche und normative Vorgaben zur Schallemissionskontingentierung, wie sie für Gewerbegebiete gelten, dargestellt und auf einen Windpark übertragen. Dazu konnte mittels einer Schallemissionskontingentierung die Aufteilung der Leistungsreduzierung auf mehrere Betreiber innerhalb eines Windparks unter Mitwindbedingungen untersucht werden. Dabei konnte eine optimale Auslastung der Flächennutzung und die Einhaltung der Planwerte an den Immissionsorten erreicht werden.

In Abhängigkeit der Windrichtung, in der die Windenergieanlagen ausgerichtet sind, treten mehrere Windsituationen (Mitwind, Querwind und Gegenwind) am Immissionsort auf. Bei der Gegenwind- und Querwind-Situation werden geringere Schallimmissionen am Immissionsort gegenüber der Mitwind-Situation verursacht. In diesen Fällen könnte eine Leistungssteigerung der Windenergieanlagen durch die Erhöhung der Emissionskontingente erreicht werden. Die Betreiber der Windenergieanlagen müssten die Windenergieanlagen so einstellen, dass sie nur bei den Windrichtungen, bei denen die Mitwind-Situation am Immissionsort verursacht wird, in ihrem Betrieb reduziert werden.

Des Weiteren könnten sich die Betreiber gegenseitig Flächenanteile verkaufen, um ihr Emissionskontingent ihrer Teilfläche zu vergrößern und damit die Leistung der Windenergieanlage zu erhöhen.

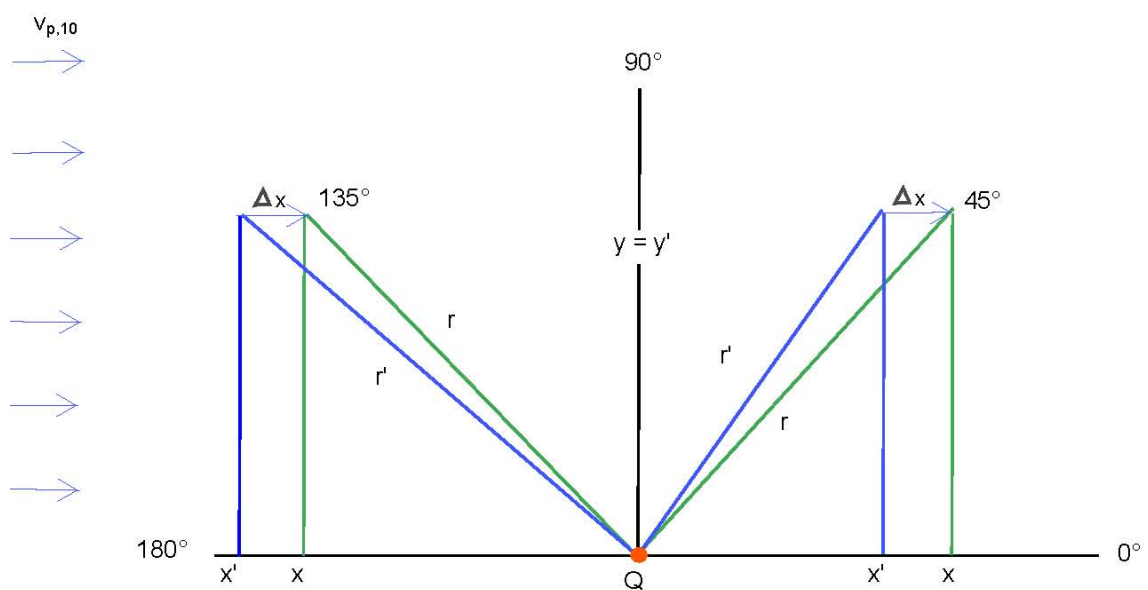


## Anhang A: Berechnungen

### Berechnung der Dämpfung zu 4.3.2.2.1

Erläuterung des Rechenweges zur Berechnung der Dämpfung  $D_{W,r}$ , die sich aus der Abstandsänderung zwischen Schallquelle und Immissionsort durch den Windeinfluss ergibt.

Skizze (Draufsicht), die Winkel  $45^\circ$  und  $135^\circ$  sind als Beispiel dargestellt



Aus der Skizze geht hervor, dass der Schallstrahl, der sich in x-Richtung ausbreitet, eine Kosinusfunktion nach Gleichung A.1 darstellt. Das bedeutet, dass sich der Schallstrahl in einem bestimmten Winkel  $\alpha$  z. B. in  $\alpha = 0^\circ$  ausbreitet und damit eine Strecke  $r$  zum Immissionsort zurücklegt. Wohingegen er, aufgrund einer Verschiebung der Kosinusfunktion um  $90^\circ$ , in y-Richtung nach Gleichung A.2 und der Skizze eine Sinusfunktion ausbildet.

$$x = r \cdot \cos \alpha \quad [\text{m}]. \quad (\text{A.1})$$

$$y = r \cdot \sin \alpha \quad [\text{m}] \quad (\text{A.2})$$

Folglich kann ein Dreiecksverhältnis für alle Windsituationen bzw. für die entsprechenden Winkel dargestellt werden. Für den Abstand  $r$  gilt:

$$r^2 = x^2 + y^2 \text{ [m]}. \quad (\text{A.3})$$

Um den tatsächlich zurückgelegten Weg  $x'$  (ohne Wind) berechnen zu können, muss die Windgeschwindigkeit berücksichtigt werden, welche die atmosphärische Schicht bewegt. Damit gilt für den tatsächlichen Weg  $x'$ :

$$x' = x - \Delta x \text{ [m]}. \quad (\text{A.4})$$

Für die Wegverschiebung  $\Delta x$  in 10 m Höhe gilt:

$$\Delta x = v_{p,10} \cdot dt \text{ [m/s]} \quad (\text{A.5})$$

mit

$$dt = \frac{r'}{c} \text{ [s]}. \quad (\text{A.6})$$

$\Delta x$  entspricht der Verschiebung des Schallstrahles durch die bewegte atmosphärische Schicht aufgrund des vorliegenden Windes in 10 m Höhe ( $v_{p,10}$ ).  $dt$  ist die Zeit indem der Weg  $r'$  zurückgelegt wurde bei einer Schallgeschwindigkeit  $c$  mit 340 m/s. Somit gilt:

$$\Delta x = v_{p,10} \cdot \frac{r'}{c} = r' \frac{v_{p,10}}{c} \text{ [m]}. \quad (\text{A.7})$$

Für  $y$  gilt:

$$y = y'. \quad (\text{A.8})$$

Da es sich hier wiederum um ein Dreiecksverhältnis handelt, kann der Abstand  $r'$  zwischen Quelle und Empfänger über den Satz des Pythagoras berechnet werden.

$$r'^2 = x'^2 + y'^2 \text{ [m]}. \quad (\text{A.9})$$

Aus Gleichung A.4, A.8 und A. 9 ergibt sich:

$$r'^2 = (x - \Delta x)^2 + y^2 \text{ [m]}. \quad (\text{A.10})$$

$$r'^2 = x^2 - 2x\Delta x + \Delta x^2 + y^2 \text{ [m]}. \quad (\text{A.11})$$

Aus Gleichung A. 3 und A. 11 ergibt sich für  $r'^2$ :

$$r'^2 = r^2 + \Delta x^2 - 2x\Delta x \text{ [m]}. \quad (\text{A.12})$$

Die zu ermittelnde Dämpfung  $D_{W,r}$  ist wie folgt zu berechnen:

$$D_{W,r} = L_1 - L_2 = 10 \lg \left( \frac{r^2}{r'^2} \right) \text{ [dB]} \quad (\text{A.13})$$

mit

$$L_2 = L_1 - 10 \lg(2\pi \cdot r^2) \text{ [dB]}. \quad (\text{A.14})$$

Die Dämpfung ergibt sich aus dem logarithmischen Verhältnis zwischen dem Abstand  $r$ , der sich aufgrund der Verschiebung der atmosphärischen Schicht durch den Wind ergibt und dem tatsächlichen Abstand  $r'$  (ohne Wind) zwischen Schallquelle und Immissionsort.

Im Folgenden muss für das Abstandsverhältnis in Gleichung A.13 der tatsächliche Abstand  $r'$  berechnet werden. Aus den Gleichungen A.1, A.7 und A.12 ergibt sich:

$$r'^2 = r^2 + \left( r' \cdot \frac{v_{p,10}}{c} \right)^2 - (2r \cos \alpha) \cdot r' \cdot \frac{v_{p,10}}{c} \text{ [m]}. \quad (\text{A.15})$$

Die Gleichung A.15 muss in einer Lösungsform von:

$$x^2 + px + q = 0 \text{ [m]} \quad (\text{A.16})$$

und

$$x_{1/2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q} \text{ [m]}. \quad (\text{A.17})$$

weiter abgeleitet werden. Damit ergibt sich:

$$r'^2 \left( 1 - \left( \frac{v_{p,10}}{c} \right)^2 \right) + r' \left( \frac{v_{p,10}}{c} \cdot 2r \cdot \cos \alpha \right) - r^2 = 0 \text{ [m]}. \quad (\text{A.18})$$

Somit ist nach Gleichung A.16 und A.18 p gleich

$$p = \frac{\frac{v_{p,10}}{c} \cdot 2r \cdot \cos \alpha}{1 - \left( \frac{v_{p,10}}{c} \right)^2} \text{ [m]} \quad (\text{A.19})$$

und q gleich

$$q = \frac{r^2}{1 - \left( \frac{v_{p,10}}{c} \right)^2} \text{ [m]}. \quad (\text{A.20})$$

Für den tatsächlichen Abstand  $r'$  ergibt sich letztendlich:

$$r'_{1/2} = \frac{r}{1 - \left( \frac{v_{p,10}}{c} \right)^2} \cdot \left[ -\frac{v_{p,10}}{c} \cdot \cos \alpha \pm \sqrt{\left( \frac{v_{p,10}}{c} \right)^2 \cdot (\cos^2 \alpha) + 1} \right] \text{ [m]}. \quad (\text{A.21})$$

Allerdings ergibt sich nur für die positive Variante eine Lösung.

Damit ergibt sich aus dem Abstand  $r$  mit 1330 m zwischen Schallquelle und Immissionsort und der Gleichung A.21 die Dämpfung  $D_{W,r}$ .

$$D_{W,r} = L_1 - L_2 = 10 \lg \left( \frac{r^2}{r'^2} \right) = 20 \lg \left( \frac{r}{r'} \right) \text{ [dB]}. \quad (\text{A.22})$$

Mit der Gleichung A.22 kann die Dämpfung  $D_{W,r}$ , für die Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe wie in Tab. 4.3.2.2.1 - 1, Tab. 4.3.2.2.2 - 2 und in Tab. B - 1 im Anhang B dargestellt, berechnet werden.

#### *Berechnung der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über den Boden*

Bei der Berücksichtigung tatsächlicher Winddaten bei einer Windenergieanlage wird von einem Geschwindigkeitsbereich in Nabenhöhe ausgegangen. Nach der Gleichung A.23 kann die Windgeschwindigkeit auf 10 m Höhe ( $v_{p,10}$ ) über den Boden umgerechnet werden, damit sie mit der gesetzlich festgelegten Mitwind-Situation in 10 m Höhe vergleichbar ist.

$$v_{p,10} = v_H \cdot \left( \frac{\ln \left( \frac{10}{z_0} \right)}{\ln \left( \frac{H}{z_0} \right)} \right) \text{ [m/s]} \quad (\text{A.23})$$

mit

- $v_H$  - Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe in m/s,
- $z_0$  - Rauigkeitslänge unter Referenzbedingungen ( $z_0 = 0,05$ ) und
- $H$  - Nabenhöhe in m.

### Berechnung der Nennleistung zu 4.3.2.2.2

#### Wirkleistungsberechnung

Nach der Gleichung A.24 wird die Leistung der Windenergieanlage für die jeweiligen Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe berechnet. Die Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe entsprechen den jeweiligen Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe, die nach Gleichung A.23 umgerechnet werden können. Mit diesen kann in Abb. 4.3.2.2.2 - 1 der tatsächliche Immissionspegel ggü. der gesetzlich festgelegten Mitwind-Situation dargestellt werden.

$$P = c_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_R \cdot v_H^3 \quad [\text{W}] \quad (\text{A.24})$$

und

$$A_R = \frac{\pi}{4} d^2 \quad [\text{m}^2] \quad (\text{A.25})$$

mit

- P - elektrische Wirkleistung in W,
- $c_p$  - Leistungsbeiwert für ein 3 -flügeligen Rotor beträgt 0,48 bei einer mittleren Schnelllaufzahl von 7 (nach Diagramm von HAU siehe Anhang C Abb. C - 1),
- $\rho$  - Luftdichte für 10°C und 70 % Luftfeuchte ( $\rho = 1,2 \text{ Kg/m}^3$ ),
- $A_R$  - Rotorfläche (Kreisfläche), dabei ist d der Rotordurchmesser in m und
- $v_H$  - Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe und geht mit der 3 Potenz in die Leistung mit ein.

Für die vorgegebene 95 % Nennleistung von 4.250 kW bei einem garantierten Schallleistungspegel von 106 dB(A) aus Abschnitt 4.3.2 muss die Gleichung wie folgt nach  $v_H$  umgestellt werden.

$$v_H = \sqrt[3]{\frac{P}{c_p \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot A_R}} \quad [\text{m/s}]. \quad (\text{A.26})$$

Dabei ist für die Leistung von 4.250 kW eine Windgeschwindigkeit von 11,31 m/s in 125 m Höhe erforderlich.

Für 25 % und 50 % der Nennleistung wird die Geschwindigkeit nach Gleichung A.26 berechnet und in Tab. B - 3 im Anhang B dargestellt. Alle restlichen Leistungen der Windenergieanlage werden über die Gleichung A.24 bestimmt. Dabei werden die Windgeschwindigkeiten in 1 m/s Schritten abgezählt wie in Tab. B - 4 im Anhang B aufgeführt.

## Anhang B: Tabellen

		Windgeschwindigkeit in m/s										
Wind in 10 m		3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0
Wind in 125 m ( $v_H$ )		4,4	5,9	7,4	8,8	10,3	11,8	13,2	14,7	16,2	17,6	19,1
Wind-situation	Winkel in Grad	Dämpfung $D_{w,r}$ in dB bei $v_{p,10}$ in m/s										
Mitwind	0,0	0,08	0,10	0,13	0,15	0,18	0,20	0,23	0,26	0,28	0,29	0,32
	22,5	0,07	0,09	0,12	0,14	0,17	0,19	0,21	0,24	0,26	0,27	0,30
	45,0	0,05	0,07	0,09	0,10	0,13	0,14	0,16	0,18	0,20	0,20	0,23
	67,5	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,09	0,11	0,11	0,12
Querwind	90,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	112,5	-0,03	-0,04	-0,05	-0,06	-0,07	-0,08	-0,09	-0,09	-0,11	-0,11	-0,12
	135,0	-0,05	-0,07	-0,09	-0,10	-0,13	-0,14	-0,16	-0,18	-0,20	-0,20	-0,23
Gegenwind	157,5	-0,07	-0,09	-0,12	-0,14	-0,27	-0,19	-0,21	-0,24	-0,26	-0,27	-0,30
	180,0	-0,08	-0,10	-0,13	-0,15	-0,28	-0,20	-0,23	-0,26	-0,28	-0,29	-0,32

Tabelle B - 1: Darstellung der Dämpfungen  $D_{w,r}$  in Abhängigkeit von der Windsituation, der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe ( $v_{p,10}$ ) und des Abstandes  $r$  von 1330 m



Tabelle B - 2: Gegenüberstellung der entsprechenden Windgeschwindigkeiten in verschiedenen Höhen

$V_{10}$ in m/s	$V_{125}$ in m/s
1	1,5
2	2,9
3	4,4
4	5,9
5	7,4
6	8,8
7	10,3
8	11,8
9	13,2
10	14,7
11	16,2
12	17,6
13	19,1
14	20,6
15	22,1
16	23,5

Tabelle B - 3: Darstellung der berechneten Windgeschwindigkeiten bei der jeweiligen Nennleistung

Nennleistung in kW	$v_{10}$ in m/s	$V_H$ in m/s
2250 (50%)	6,2	9,15
1125 (25%)	4,9	7,26

Tabelle B - 4: Darstellung der berechneten Nennleistung einer pitch-gesteuerten WEA bei der jeweiligen Windgeschwindigkeit

Nennleistung in kW	$v_{10}$ in m/s	$V_H$ in m/s
4500	7,8	11,52
4250	7,66	11,31
3240	7	10,33
2045	6	8,86
1182	5	7,38
607	4	5,91
256	3	4,43

Teilfläche	Abstand s in m				Fläche S in m²	Differenz $\Delta L$ in dB(A)			
	1. IO	2. IO	3. IO	4. IO		1. IO	2. IO	3. IO	4. IO
1	1560,00	2769,70	4768,00	2769,70	855.600	15,53	20,52	25,24	20,52
2	2248,00	2436,70	4080,00	2436,70	1.703.760	15,71	16,41	20,89	16,41
3	3164,00	2258,00	3164,00	2258,00	425.024	24,71	21,78	24,71	21,78
4	4080,00	2436,70	2248,00	2436,70	1.703.760	20,89	16,42	15,71	16,42
5	4768,00	2769,30	1560,00	2769,30	855.600	25,24	20,52	15,53	20,52
6	3266,50	1446,00	3266,50	3070,00	214.344	27,96	20,88	27,96	27,43
7	3197,80	1794,00	3197,80	2722,00	425.024	24,80	19,78	24,80	23,41
8	3197,80	2722,00	3197,80	1794,00	425.024	24,80	23,41	24,80	19,78
9	3266,50	3070,00	3266,50	1446,00	214.344	27,96	27,43	27,96	20,88

Tabelle B - 5: Darstellung der geometrischen Rahmenbedingungen für die Emissionskontingente

Teilfläche	Emissions- kontingent $L_{EK}$ in dB(A)	Immissionskontingent $L_{IK}$ in dB(A)			
		1. IO	2. IO	3. IO	4. IO
1	47,00	31,5	26,5	21,8	26,5
2	44,00	28,3	27,6	23,1	27,6
3	50,00	25,3	28,2	25,3	28,2
4	44,00	23,1	27,6	28,3	27,6
5	47,00	21,8	26,5	31,5	26,5
6	53,00	25,0	32,1	25,0	25,6
7	50,00	25,2	30,2	25,2	26,6
8	50,00	25,2	26,6	25,2	30,2
9	53,00	25,0	25,6	25,0	32,1
Planwert in dB(A)		40,0	35,0	40,0	40,0
$L_{IK,ges}$ in dB(A)		36,1	37,9	36,1	37,9
Unter-/Überschreitung in dB		-3,9	2,9	-3,9	-2,1

Tabelle B - 6: Erste Festsetzung der Emissionskontingente für die Nacht und die sich daraus ergebenden Immissionskontingente, Festlegung der Unter- bzw. Überschreitungen der Planwerte an den Immissionsorten

Teilfläche	Emissions- kontingent $L_{EK}$ in dB(A)	Immissionskontingent $L_{IK}$ in dB(A)			
		1. IO	2. IO	3. IO	4. IO
1	44,00	28,5	23,5	18,8	23,5
2	40,00	24,3	23,6	19,1	23,6
3	46,00	21,3	24,2	21,3	24,2
4	40,00	19,1	23,5	24,3	23,5
5	44,00	18,8	23,6	28,5	23,6
6	49,00	21,0	28,1	21,0	21,6
7	46,00	21,2	26,2	21,2	22,6
8	50,00	25,2	26,6	25,2	30,2
9	53,00	25,0	25,6	25,0	32,1
$L_{IK,ges}$ in dB(A)		33,4	34,8	33,4	36,2
Unterschreitung in dB		- 6,6	-	- 6,6	- 3,8
$L_{EK,zus}$ in dB(A)		6,00	-	6,00	3,00

Tabelle B - 7: Korrektur der Emissionskontingente durch die Minderung der Werte am zweiten Immissionsort, Entstehung von Unterschreitungen der Planwerte an den Immissionsorten, Festlegung von Zusatzkontingenten

## Anhang C: Abbildungen

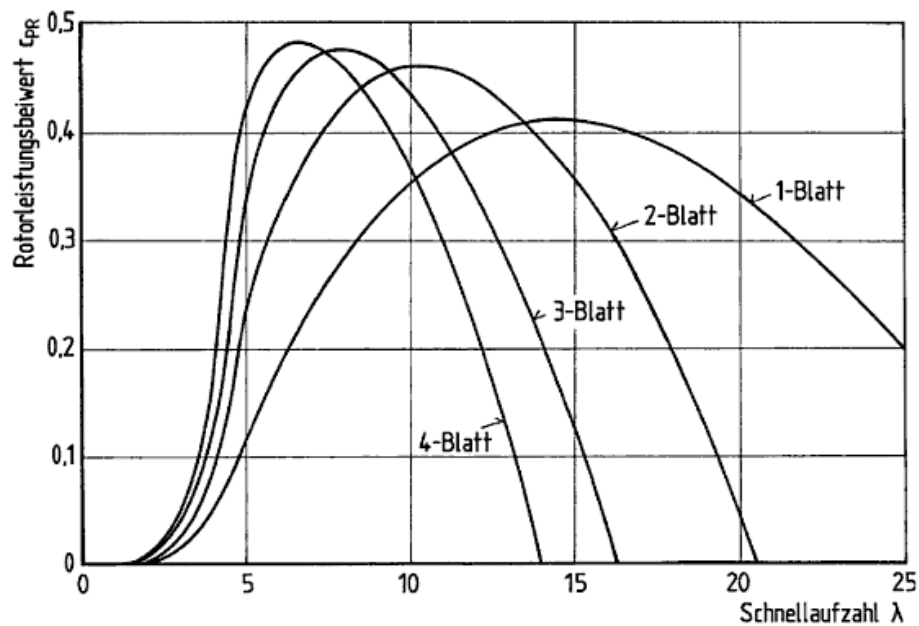


Abbildung C - 1: Darstellung des Rotorleistungsbeiwertes<sup>13</sup> ggü. der Schnellaufzahl<sup>14</sup> für eine 3 -flügelige Windenergieanlage aus [28]

<sup>13</sup> Leistungsbeiwert ist das Verhältnis aus genutzter Windleistung zu ankommender Windleistung.

<sup>14</sup> Die Schnellaufzahl ergibt sich aus dem Verhältnis der Umfangsgeschwindigkeit am äußeren Ende des Rotors (Blattspitzengeschwindigkeit) zur Windgeschwindigkeit vor dem Rotor.

## Literaturverzeichnis

- [1] Deutsche Energie - Agentur: Windindustrie in Deutschland. <<http://www.thema-energie.de/energie-erzeugen/erneuerbare-energien/windenergie/grundlagen>>. Datum des Zugriffs 7.01.2010
- [2] Winkelmeier, Hans: Energiesysteme – Windenergie, 02 - Bauformen und Aerodynamik von Windkraftanlagen. <[http://www.energiwerkstatt.org/download/Bauformen\\_Aerodynamik](http://www.energiwerkstatt.org/download/Bauformen_Aerodynamik)>. Datum des Zugriffs: 7.01.2010
- [3] Suzlon Energy GmbH: Azimutsystem. <[http://www.suzlon.de/seiten/azimut\\_s.html](http://www.suzlon.de/seiten/azimut_s.html)>. Datum des Zugriffs 23.10.2009
- [4] Energieroute.de: Windenergie. <<http://www.energieroute.org/wind/wind2.php>>. Datum des Zugriffs 22.10.2009
- [5] Bundesverband Windenergie e.V.: Technik. <<http://www.wind-energie.de/de/technik/>>. Datum des Zugriffs: 08.01.2010
- [6] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.: WEA-Aufbau. <<http://www.vde.com/de/fg/ETG/Arbeitsgebiete/V1/Aktuelles/Oeffentlich/Seiten/Windenergie>>. Datum des Zugriffs 23.10.2009
- [7] Beck: Umweltrecht - UVPG. 18. Auflage. - München.: Deutscher Taschenbuch Verlag, 2006. S.38
- [8] Sächsisches Staatsministerium des Innern; Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft: Gemeinsame Handlungsempfehlung des Sächsischen Staatsministerium des Innern und Sächsischen Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft zur Zulassung von Windkraftanlagen. <<http://www.bauen-wohnen.sachsen.de/download/SMI/Gem-Handlungsempfehlung-Zulassung-Windenergieanlagen-08-08-2007>>. Dresden, 2007, S. 3 ff.
- [9] Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm). 26.08.1998
- [10] Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen: Materialienband Nr. 63. Windenergieanlagen und Immissionsschutz. Essen, 2002
- [11] Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen: Sachinformationen zu Geräuschemissionen und –immissionen von Windenergieanlagen. <[http://www.windenergie.de/fileadmin/dokumente/ThemenA-Z/Infraschall/lua\\_nrw\\_geraeusch-verhalten](http://www.windenergie.de/fileadmin/dokumente/ThemenA-Z/Infraschall/lua_nrw_geraeusch-verhalten)>. Datum des Zugriffs 28.10.2009
- [12] Norm VDI 2714: Schallausbreitung im Freien. VDI – Verlag GmbH. 01/1988
- [13] Norm DIN ISO 9613: Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien, Teil 2. Allgemeines Berechnungsverfahren. Beuth Verlag. 10/ 1999

- [14] Universität Duisburg: Schallausbreitung im Freien. <<http://www.uni-due.de/ibqm/BauPhy/Schall/Buch/25.00-vor26.htm>>. Datum des Zugriffes 1.11.2009
- [15] Künzel, K.: Technische Akustik - Kapitel 1.5 Schallausbreitung im Freien. - Mittweida, Fachhochschule, Fachbereich Mathematik, Physik, Informatik, Hochschulschriften, SS 2007
- [16] Norm DIN 45680: Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft. Beuth Verlag. 03/ 1997
- [17] Rothaar Wind GmbH: Geräuschemissionen.<[http://www.rothaarwind.de/windenergie/mod\\_content\\_page/seite/Geraeuschemissionen/index.html](http://www.rothaarwind.de/windenergie/mod_content_page/seite/Geraeuschemissionen/index.html)>. Datum des Zugriffes 1.11.2009
- [18] Norm DIN 45681/ E: Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen. Beuth Verlag. 01/ 1992
- [19] Norm DIN 45645: Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen, Teil 1: Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft. Beuth Verlag. 07/ 1996
- [20] Fördergesellschaft Windenergie e.V.: Technische Richtlinie für Windenergieanlagen, Teil 1 - Bestimmung der Schallemissionswerte -. Revision 13. Kiel. Stand 1.1.2000
- [21] Norm DIN EN 61400, Teil 11: Windenergieanlagen - Schallmessverfahren. VDE Verlag GmbH. 11/2003
- [22] Gasch, Robert; Tvele Jochen: Windkraftanlagen - Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb. - 4. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. - Wiesbaden: B. G. Teubner Verlag, 2005, S. 506
- [23] Piorr, D.: Schallemissionen von Windkraftanlagen. Fortschritte der Akustik, DAGA '88, 1988, Seite 201ff.
- [24] ECO Akustik: Gutachten über Emissionen von Windenergieanlagen von Typ Enercon E66/20.70 und E-70E4 im Windpark Thurland. ECO Akustik. 12/2007
- [25] Norm DIN 18005 Beiblatt 1: Berechnungsverfahren - Schalltechnische Orientierungswerte für die städtebauliche Planung. Beuth Verlag. 05/1987
- [26] Norm DIN 18005, Teil 1: Schallschutz im Städtebau - Berechnungsverfahren. Beuth Verlag. 05/1987
- [27] Norm DIN 45691: Geräuschkontingentierung. Beuth Verlag. 12/2006, S. 10
- [28] Hau, Erich: Windkraftanlagen - Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit. - 4. vollständig neu bearbeitete Auflage. - Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2008, S. 138 und 605 ff.
- [29] BINE Informationsdienst: Windenergie. <[http://www.ikzmd.de/infos/pdfs/45\\_BINE\\_Windenergie](http://www.ikzmd.de/infos/pdfs/45_BINE_Windenergie)>. Datum des Zugriffes 5.11.2009

- [30] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen: <[www.lanuv.nrw.de](http://www.lanuv.nrw.de)>. Geräuschemissionen hoher Windenergieanlagen. LANUV-Fachbericht 3. Recklinghausen, 2007, S. 9
- [31] Schönfelder, Rene: Messung des Schallimmissionsverhaltens von Windkraftanlagen in orographisch komplexen Gelände.- 1996. - 167 S. Mittweida, Fachhochschule, Fachbereich Mathematik, Physik, Informatik, Diplomarbeit, 1996, S. 34 - 45, 58 ff.
- [32] Beck: Umweltrecht - UVPG. 18. Auflage. - München.: Deutscher Taschenbuch Verlag, 2006. S. 40 f., S. 62
- [33] Beck: Umweltrecht - BImSchG. 18. Auflage. - München.: Deutscher Taschenbuch Verlag, 2006. S. 435 ff.
- [34] Bundesministerium der Justiz: Baugesetzbuch (BauGB). <<http://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/bbaug/gesamt>>. Datum des Zugriffs 14. 01. 2009
- [35] Kötter Beratende Ingenieure: Schalltechnischer Bericht Br. 32253-9.003 - Schallimmissionsprognose für den Windpark Salzfurtkapelle. 2005, S. 33,36



## Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift